



## Moisture transport and convection in building envelopes

Gudum, Charlotte

*Publication date:*  
2003

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Gudum, C. (2003). *Moisture transport and convection in building envelopes*. Technical University of Denmark. Byg Rapport No. R-047

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# Appendices

## Moisture Transport and Convection in Building Envelopes Ventilation in Light Weight Outer Walls

Charlotte Gudum

Appendix A: Målinger på en kybekælder i Lundegården

Appendix B: Jævn dosering af sporgas i vandret plan på ventileret lodret spalte

Appendix C: Måling af lufthastighed i ventileret spalte på lodret facade ved brug af sporgas

Appendix D: Statistical analysis of correlations between wind velocities and cavity air velocities

Appendix E: Graphical representation of Simulink models

Appendix F: HAM transport in materials, including liquid transport and thermo effusion

Appendix G: Calculation of discharge coefficients

Appendix H: Parameters in the Simulink reference year

Appendix I: Moisture measurements at Danish Building and Urban Research

PhD thesis  
2. edition  
August 2002

# Appendix A

Målinger på en kybekælder i Lundegården

# Målinger på en krybekælder i Lundegården

Charlotte Gudum



SAGSRAPPORT

**SR-9820**

1998

INSTITUT FOR BYGNINGER OG ENERGI  
DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET

## **Forord**

En stor tak til Birch og Krogboe som har stillet måleudstyr og arbejdstimer til rådighed, uden hvilke det foreliggende datamateriale ville have været mere sparsomt. Særlig tak til Lars D. Christoffersen for hans store arbejde i forbindelse med opsætning af måleudstyr, logning af data og senere kommentering af rapporten. Også tak til Eva B. Møller for fremskaffelse og udlån af tegninger og rapporter, samt faglige diskussioner.

Ligeledes en tak til Martha og Paul Kern-Jespersens Fond, der med legat har gjort det muligt at foretage værdifulde målinger, der har været vigtige for projektet.

## Indholdsfortegnelse

1. Synopsis .....	2
2. Indledning .....	2
3. Definition .....	3
4. Baggrund for krybekælderproblemer .....	3
5. Byggetekniske anbefalinger og krav .....	3
6. Problemer i et aktuelt byggeri .....	4
6.1 Det historiske forløb .....	5
6.2 Beskrivelse af krybekælderens .....	6
6.3 Krybekælderens afvigelse fra nutidens anbefalinger .....	7
6.4 Hypotese .....	8
7. Måling og simulering af ventilation, temperatur og relativ fugtighed .....	8
7.1 Ventilation og luftskifte .....	8
7.1.1 Luftskiftemåling med sporgasanalyser .....	8
7.1.2 Resultater af sporgasmålinger .....	9
7.1.3 Sammenligning af målt og beregnet luftskifte .....	13
7.1.4 Computersimulering af luftskifte i krybekælder .....	15
7.2 Måling af temperatur og relativ fugtighed .....	15
7.2.1 Instrumentering .....	16
7.2.2 Resultater for måling af temperaturer .....	16
7.2.3 Resultater for måling af relativ fugtighed .....	17
7.2.4 Resultater for måling af absolut fugtighed i luften .....	18
7.2.5 Delkonklusion for måleresultaterne .....	21
7.3 Simulering af krybekælders fugt- og temperaturforhold med Cics .....	21
7.4 Ventilationens påvirkning af den relative fugtighed .....	24
8. Konklusion .....	27
9. Litteraturliste .....	28

# **Krybekældre -et studie af ventilation, temperatur og fugtighed**

## **1. Synopsis**

Nærværende rapport er en gennemgang af krybekældre og ventilation for at studere de fugttekniske problemer, der optræder i disse. Der er foretaget målinger i en krybekælder beliggende i bebyggelsen Lundegården I i Ballerup, med supplerende målinger i to tilstødende boliger, hvor den ene var beboet.

Krybekælderens opbygning gennemgås og sammenlignes med de byggetekniske krav, der stilles til nutidigt byggeri.

Målinger af de hygrotermiske forhold analyseres og sammenholdes med simuleringer. Desuden afrapporteres om luftskiftemålinger foretaget i krybekælderens.

## **2. Indledning**

En krybekælder er en del af fundamentet på en bygning, hvor krybekældervæggene er den bærende konstruktion. Den er karakteriseret ved at bygningens gulv hviler på krybekælderens vægge, med en passende fugtspærre, der hindrer opsugning af grundfugt ved, at der ikke er direkte kontakt mellem gulv og jord.

Korrekt udført er krybekælderens en fugtteknisk sikker konstruktion, der anvendes i tilfælde med særlig fugtig jordbund eller tilstrømmende overfladevand. En del af året kan den ventileres med ude- eller indeluft for at fjerne indtrængende vand og byggefugt.

Betegnelsen kold eller varm krybekælder henviser til, hvor godt fundamentet er isoleret. En varm krybekælder skal, når der opstilles en varmebalance under dimensionerende forhold, have en temperatur på min. 10°C [1].

En krybekælder giver mulighed for skjulte rørføringer, der som regel er nemme at komme til. Dog udføres der krybekældre, der er så lave, at passage ikke er mulig. Derudover benytter folk krybekælderens til opbevaring.

Der har været en del negativ omtale af krybekældre i forbindelse med dårligt indeklima i boliger, som man mener stammer fra krybekælderkonstruktionen. Udgangspunktet for at udføre en dækkonstruktion i form af en krybekælder, vil ofte være en vanskelig undergrund, hvorfor der indirekte er en større risiko forbundet med denne konstruktion. De problemer der er blevet observeret er tilsyneladende ved brug af nye konstruktionstyper, hvor man f.eks. i den undersøgte bebyggelse, der er placeret i gammelt moseområde, har dampspærren liggende ubeskyttet direkte på jord.

De afrapporterede målinger er foretaget i Rævens kvarter 55, 56 og 57 i bebyggelsen Lundegården I i Ballerup. Hvor nr. 55 og 57 er ubeboede og nr. 56 er beboet. De tre boliger er ens og ligger midt i en blok med tilstødende boliger på to sider. Boligerne er udvalgt ud fra at to af de tre er ubeboede, ligger fornuftigt indbyrdes i fht. ledningsføring og i et område der

renoveres som et af de senere områder. Renoveringsrækkefølgen er dels motiveret af praktiske forhold og dels af at de hårdest belastede boliger renoveres først. Det har den konsekvens, at de undersøgte boliger ikke hører til blandt de hårdest belastede.

### **3. Definition**

Krybekældere defineres som et lavt tilgængeligt rum mellem terræn og nederste dæk. Konstruktionen skal hindre at træbjækelag kommer i direkte kontakt med jordfugt. [2]

### **4. Baggrund for krybekælderproblemer**

En krybekælder tilføres fugt fra grunden ved fordampning af jordfugt, fugt i ventilationsluften i varme fugtige perioder og indtrængende overfladevand. Denne fugttilførsel begrænses ved en passende bund i krybekælderen og ved at ventilere krybekælderen i kolde tørre perioder. Tilstrømmende overfladevand afledes. Endelig har temperaturen i krybekælderen betydning for fugtforholdene og den nødvendige ventilation.

Der er altså tale om flere mulige fugtkilder, og fugttransport både i form af diffusion og kapillarledning. Fjernelsen af fugten sker også vha. flere mekanismer: ventilation, temperaturgradienter og afledning. Samspillet mellem de forskellige transportformer udgør en balance, som vanskeligt lader sig analysere i detaljer, da mange individuelle faktorer spiller ind. Alternativet er at gøre nogle antagelser, der forsimples problemstillingen, men alligevel giver et rimeligt billede af de fysiske processer, der påvirker klimaet i krybekælderen.

### **5. Byggetekniske anbefalinger og krav**

Kravene i det danske bygningsreglement er, at konstruktionen udføres fugtteknisk sikkert. Dette krav opfyldes ved at følge de anbefalinger, der udgives af SBI, som i f.eks Bygningers fugtisolering, SBI-anvisning 178.

Fordampning af jordfugt reduceres ved et 80 mm tykt betonlag, der kan suppleres med en fugtspærre der holdes på plads med et lag sand, eller bedre et lag beton. Fugtspærren skal have fald mod krybekælderens ydervægge, og bør stoppe 20-30 mm fra væggen, så eventuelt indstrømmende vand kan løbe af. Ved ikke tør undergrund anbefales, at der under det nederste betonlag laves et kapillarbrydende lag.

Risikoen for indtrængende overfladevand mindskes ved at lade terrænet have et fald væk fra bygningen på minimum 1:50, ventilationshullers underkant placeres min. 100 mm over terræn, samt ved at udføre dræning omkring bygningen.

En krybekælder kan udføres som en varm krybekælder ved at varmeisolere bunden og siderne, sådan at temperaturen under dimensionerende forhold ikke kommer under 10°C [1]. Herved kan man bevare rørføringen i krybekælderen, idet varmetabet fra rørene begrænses og kommer boligen til gode igennem det uisolerede dæk over krybekælderen. Der skal være



plastfolie under gulvbrædder for at undgå træk og indtrængning af radon. Er dækket af beton eller letbeton kan folien udelades. Der skal være enkelte ventilationsåbninger til udeluften, men rørgennemføringer skal være lufttætte. Kravene til svag ventilation opfyldes ved at der f.eks. i et enfamiliehus er to åbninger på 50 cm<sup>2</sup> i to modstående sider.

Er krybekælderen udført som en kold krybekælder, skal dækket over krybekælderen isoleres inkl. dampspærre, og varmerør skal føres over isoleringen. For at opnå tilstrækkelig ventilation anbefales at der udføres mindst en ventilationsåbning for hver 6 meter ydervæg, og at hver åbning har et minimumsareal på 150 cm<sup>2</sup>. For at undgå lommer med stillestående luft, anbringes åbningerne nær hjørner. Åbningerne i de indvendige vægge skal have en passende størrelse, der tillader en person at passere i tilfælde af inspektion.

Krybekælderen skal holdes ren for byggeaffald, planterester og andet der kan give næring og grobund for svamp og skimmel.

For overskuelighedens skyld indføres ovenstående i et skema nedenfor.

	Isoleret væg/fundament	Isoleret dæk	Plastfolie under gulv	Rørføring i kælderen	Ventileret
Varm krybekælder	+	-	+/- *	+	svagt
Kold krybekælder	-	+	+	-	kraftigt

\*Der anvendes altid plastfolie ved trægulv.

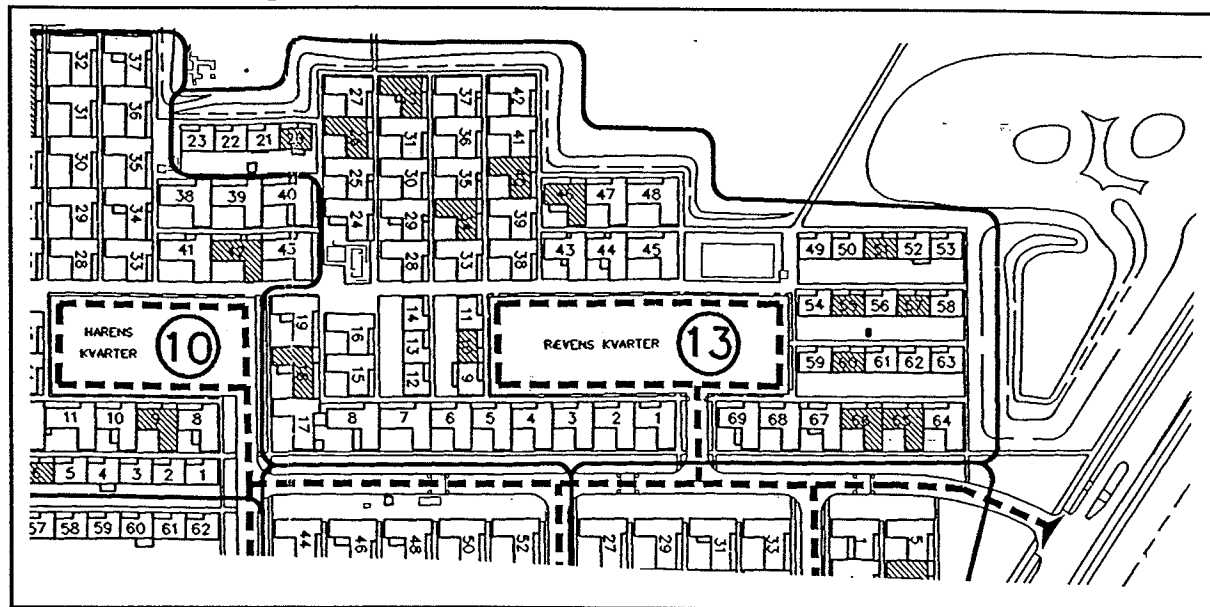
Ligger bygningen med vanskelige bundforhold bør krybekælderen udføres med et kapillarbrydende lag. Der bør desuden være mulighed for at udtørre byggefugt, ved eksempelvis at have ekstra ventilationshuller der lukkes, når byggefugten er udtørret (efter første vinter).

## 6. Problemer i et aktuelt byggeri

Der er foretaget studier og målinger i Lundegården I, en større gårdhavebebyggelse i Ballerup. Området har igennem mange år været plaget af fugtproblemer. Årsagerne til disse problemer er belyst igennem rapporter og har givet anledning til en tidligere renovering af tagkonstruktionen, samt pilotprojekter, der skulle afhjælpe fugtproblemer i krybekælderne. Man har i dag startet en gennemgribende totalrenovering af hele bebyggelsen, så den forventes at stå som ny, når arbejdet er udført.

Boligbebyggelsen med 628 gårdhuse stod færdigbygget i 1969. Bebyggelsen totalrenoveres i dag (1997) til en pris, der svarer til prisen for nybyggeri. I renoveringsplanen bevares de tunge facadeelementer, der efterisoleres, og infrastrukturen med fjernvarmeledninger, el og vandforsyning. Ligeledes bibeholdes selve bebyggelsesplanen.

Se udsnit af områdeplan nedenfor



**Figur 1** Udsnit af områdeplan for Lundegården I i Ballerup

## 6.1 Det historiske forløb

Opførelsen af bebyggelsen, der stod færdig i 1969, var første gang man opførte enfamiliehuse som montagebyggeri i større stil. Ingen af de eksisterende byggesystemer fandt man egnede til at løse den foreliggende opgave, hvorfor hver eneste byggekomponent blev analyseret fra grunden. Krybekælderen er f.eks. udviklet på basis af svenske og amerikanske undersøgelser, der godtgør at temperatur og fugtforhold i kælderen er acceptable, når kælderen udføres uden betonklaplag og varmeisolering. Gennem målinger udført af SBI 1965-66 er det godtgjort at konstruktionen virker som forudsat.

I SBI-undersøgelsen bemærkes følgende konklusion vedrørende krybekælderkonstruktionen: "I det her undersøgte præfabrikerede byggeri er fugerne imellem vægge og fundamenter udnyttet til at give en ensartet ventilation af hele kryberummet, og det må frygtes, hvorledes det vil gå, hvis den samme principløsning overføres til traditionelt byggeri, hvor åbningerne nødvendigvis må blive mere veldefinerede med deraf følgende fare for tillukning." [5]

Ventilation af krybekælderen ændres inden byggeriets start fra at være igennem sprækker mellem ydervæg og sokkel til at ske igennem et 8 cm<sup>2</sup> hul i gavlsoklen. Denne ændring accepteres af bygningsinspektoret under henvisning til rapport nr. 15 fra Norges Byggeforskningsinstitut.

I 1981 afsluttedes en tagrenovering. Besigtigelsesnotat fra 30.07.81 påpeger ifølge [4] fugtproblemer, grundet vand- og fugtansamlinger i krybekælderen. Problemerne blev henført til en meget regnfuld periode, hvor tagafløbet samtidig havde været mangelfuldt, som følge af tagrenoveringen.

I 1985 omlagde man til naturgas og sænkede i den forbindelse fremløbstemperaturen til min. 72°C. Den tidligere højere fremløbstemperatur betød større varmetab og dermed højere temperatur i krybekælderen. Med den højere temperatur havde kælderen bedre mulighed for at udtørre, og den relative fugtighed var lavere, idet luftens fugtkapacitet stiger med temperaturen.

Fugtproblemer blev igen nævnt i juni 1989 i projektforslag til udbedring af byggeskader fra ingeniørfirmaet Wissenberg.

Individuelle varmemålere blev sat op i 1991-92. Dette bevirker at boligerne i mange tilfælde må forventes at blive udluftet mindre.

I 1990 blev fjernvarmeledningerne i jorden skiftet. I foråret 1995 viste undersøgelse fra Wissenberg at reetablering af dræn, i forbindelse med nye fjernvarmeledninger, havde været mangelfuld, hvilket gav fugt i krybekældrene. Samme konklusion kom Klaus Nielsen A/S til i 1995.

Fugtundersøgelse 1994/95 af DOMINIA konkluderer at hovedårsagen til fugtproblemerne vurderes at findes i de utilstrækkelige isoleringsforhold. Hermed menes utidssvarende isolering af hele klimaskærmen. Men også andre forhold spiller ind. [10]

Birch & Krogboe starter totalrenovering i 1996.

Siden opførelsen af byggeriet har man udført efterisolering af fjernvarmeledningerne og efterisolering af krybekældrene ved at udlægge en 50 mm Glasuld-måtte langs kældervægge.

## **6.2 Beskrivelse af krybekælderen**

Den oprindelige krybekælder udførtes uden betonklaplag og varmeisolering. Konstruktionen er udviklet på basis af svenske og amerikanske undersøgelser, der godtgør, at temperatur- og fugtforhold i konstruktionen er acceptable sammenlignet med forholdene i sædvanlige krybekældertyper. Som fugtisolering mod jord er der udlagt en 0,15 mm plastfolie, der samles med ca. 150 mm simple overlæg uden forsegling. Krybekælderen er ventileret til det fri gennem 2 huller Ø32 mm og et Ø50 mm i et af elementerne ved bygningens udadgående hjørner. Derudover er der to huller Ø100 mm (skønnet) mellem krybekælder og badeværelse. Sokkelementerne er isoleret på indersiden med 25 mm skumplast, men der er ingen isolering i gulvet. Uisolerede radiatorrør og varmtvandsbeholder i kryberummet bidrager til at holde en relativ høj temperatur (ca. 19°C) i kælderen året rundt. Krybekælderen ventileres op i huset, dels gennem fuger og sprækker i gulvet, dels gennem riste placeret i baderum og toilet, hvorfra der er aftræk til det fri.

Gennem målinger udført af SBI i 1965-66 er det ved feltforsøg godtgjort, at en lignende konstruktion virker som forudset. Temperaturen i kryberummet ligger året rundt på 16-22°C, hvad der giver behageligt lune gulve, og den relative fugtighed holder sig ligeledes ret konstant på 60-70 pct. Varmetabet fra kælderen er noget større end for isoleret krybekælder eller terrændæk med en U-værdi omkring 0,5 W/m<sup>2</sup>K, men da gulvene er varme, er de hygiejniske krav fuldt ud tilgodeset, og det forøgede varmetab kompenseres stort set af de mindre anlægsudgifter til kælderkonstruktionen [3]. Formelt set kan krybekælderen karakteriseres som varm, når der opstilles en varmebalance. Herved kan rørføring i krybekælderen accepteres og den skal ventileres svagt. Udfra et energimæssigt synspunkt er det ikke rimeligt at krybekælderen opvarmes ved spildvarme, og den burde betragtes som en kold krybekælder udfra dens isoleringsmæssige standard.

### 6.3 Krybekælderens afvigelse fra nutidens anbefalinger

Krybekælderen er udført som en varm krybekælder, men med nutidens krav til isolering er varmetabet uacceptabelt stort. For en varm krybekælder gælder at bund og sider er isoleret, mens dækket er uisolert. Den kolde krybekælder adskiller sig herfra, ved at have isoleret dæk og gerne uisolert bund og sider. Rørføring i en kold krybekælder skal foregå over isoleringen, således at overskudsvarmen kommer boligen til gode.

Der opstilles en varmebalance for krybekælderen med varmetab som angivet i DS-418 og ventilationstab beregnet efter SBI-anvisning 184, hvor der ikke medtages varmekilder i form af varmetab fra rør. Resultatet under dimensionerende forhold er en temperatur på 17,7°C eller 17,0°C når ventilationen sættes til hhv. 0,1 time<sup>-1</sup> eller 0,5 time<sup>-1</sup>. Den høje temperatur i krybekælderen skyldes at kun et lag gulvbrædder skiller krybekælder fra boligen.

Definitionen af varm og kold krybekælder har betydning for, om der skal ventileres svagt eller kraftigt i krybekælderen, for at holde fugtforholdene på et tilfredsstillende niveau. Krybekælderen i Lundegården er ventileret svagt i overensstemmelse med de eksisterende temperaturforhold. Med den varme krybekælder kan man desuden tillade det varmetab, der sker fra rørføringer i kælderen.

Uanset om det er en kold eller varm krybekælder beskyttes den mod indtrængende vand og fugt. En polyethylenfolie på 0,20 mm med fald mod ydervægge, der stopper 20-30 mm fra væggene, så eventuelt indstrømmet vand kan sive væk. Fugtspærren holdes fast med et lag sand. Såfremt kælderens forventes benyttet til opbevaring, eller der skal være adgang til installationer beskyttes folien af et betonlag.

I tilfældet med Lundegården er folien ikke tilstrækkelig beskyttet, der er ikke taget særlige hensyn ved overlap og der er ikke det påkrævede fald mod ydervægge. Terrænet uden for krybekælderen har ikke fald bort fra bygningen. Ventilationsåbninger har ikke underkant over 100 mm over terræn, og endelig har tidligere undersøgelser vist, at drænene ikke fungerer, som de skal.

Det foreslås i SBI-anvisning 178 at en varm krybekælder, der skal ventileres svagt i forhold til en kold, har to modsatstående ventilationsåbninger på hver 50 cm<sup>2</sup>. Dette kan Lundegården

ikke opfylde, dog kompenseres der med ventilation fra kælder via badeværelse til det fri.

Når dækket er udført som et træbjælkelag som i Lundegården bør der indlægges plastfolie direkte under gulvbrædderne for at skabe tæthed mod radon. Dette findes ikke i Lundegården.

## **6.4 Hypotese**

Det formodes at den relative fugtighed i kælderluften i visse perioder overstiger kritiske fugtforhold på 72%. Det forventes at perioderne med relativ fugtighed over det kritiske niveau er begrænset til mindre end 6 uger, der er grænse for svampe- og skimmelvækst.

Det forventes at ved i simuleringer at øge luftskiftet og begrænse fordampningen fra kælderbunden, kan opnås tilfredsstillende klimaforhold hele året.

## **7. Måling og simulering af ventilation, temperatur og relativ fugtighed**

Det antages at luftskiftet er afgørende for fugt- og temperaturforholdene i krybekældre. Størrelsen af luftskiftet er afhængig af ventilationshullernes størrelse, placering og udførelse og det varierer med vind- og temperaturforhold.

I et ubeboet lejemål, Rævens kvarter 55, foretages luftskiftemålinger med sporgasteknik. Til måling af temperatur og relativ fugtighed opsættes tre sæt termo- og relativ fugtighedsfølere, med automatisk datalogning hvert 10. min, i kælderen og et sæt i køkkenet samt et udenfor boligen, til registrering af de metrologiske forhold. Som kontrol foretages en måling af temperatur og relativ fugtighed centralt i kælderen og i boligen for Rævens kvarter 56 og 57, hvor nr. 56 er beboet og nr. 57 er ubeboet.

### **7.1 Ventilation og luftskifte**

Luftskiftet angiver hvor mange gange luften udskiftes i timen for et givet lokale. Ventilation er et mere anvendt ord for hvor mange  $m^3$  luft, der udveksles med omgivelserne eller tilstødende lokaler per tid. Ventilation og luftskifte bruges i flæng.

#### **7.1.1 Luftskiftemåling med sporgasanalysator**

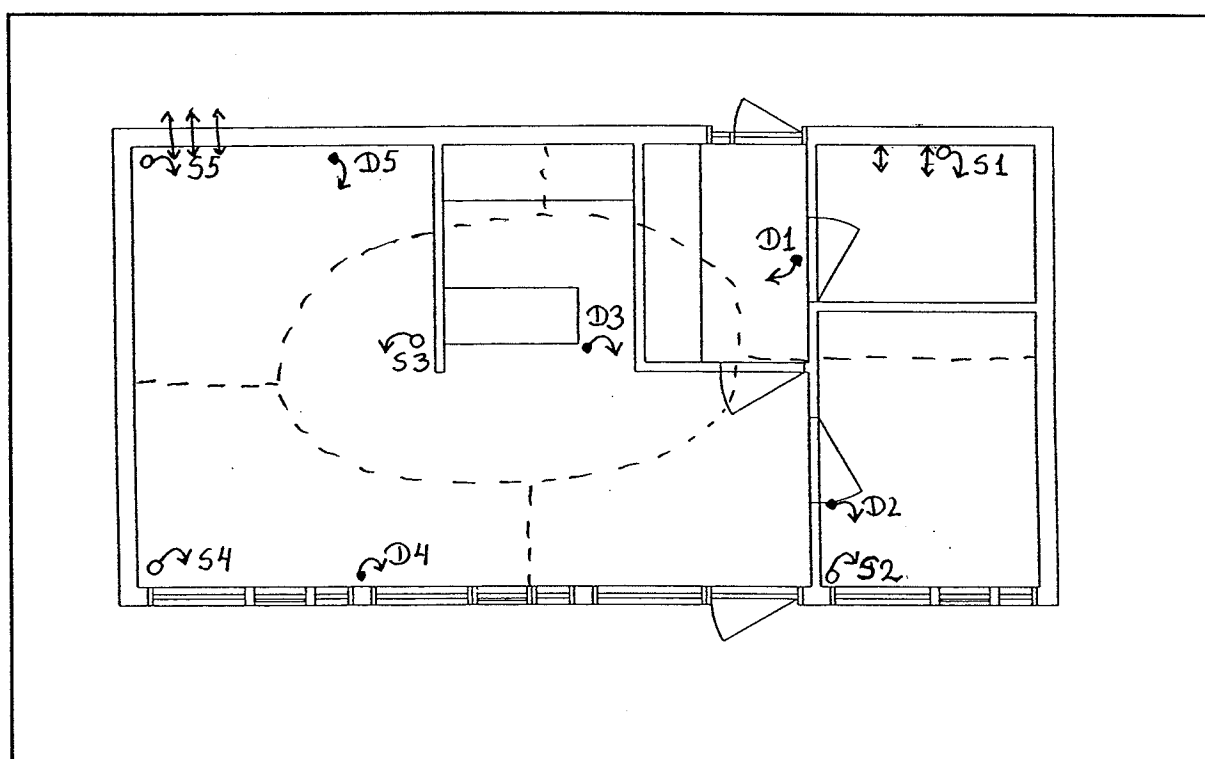
Ved anvendelse af gasanalysator 1302 kombineret med computerstyret doserings- og opsamlingsenhed 1303, begge fra Brüel & Kjær, er der foretaget kontinuerte målinger af luftskiftet over 3,5 døgn i slutningen af juli 1997 (1.måling), og to målinger i slutningen af marts/starten af april 1998 af en varighed på hhv. 3 og 4 døgn (2. og 3. måling), alle gange med konstant koncentration metode.

Som sporgas er anvendt  $SF_6$ , der er en inaktiv og relativ tung gas, hvorfor der blev opsat to ventilatorer til at sikre opblanding i de to første forsøg, som det er kutume i Danmark. I 3. måleperiode blev ventilatorerne slukket, for dels at vurdere den kunstige opblandings

betydning for resultaterne af luftskiftets størrelse og dels for at kunne vurdere, om der opstår lommer med stillestående luft.

Tidligere svenske forsøg har vist, at ventilatorerne kan udelades. Opblanding af sporgas med ventilatorer påvirker resultatet med 10% [6], og hindrer muligheden for at identificere eventuelle stillestående luftlommer. Vanddampdiffusion i luft anses for værende så ringe at evt. luftlommer kan give fugtproblemer, selv om luftskiftet som helhed for krybekælderen er tilfredsstillende.

Fra doserings- og opsamlingsenhed blev der trukket 5 doserings- og 5 opsamlings-slanger til hhv. dosering og opsamling af sporgas jævnt i kryberummet. Slangerne blev ført ned i kælderen igennem passende huller boret i trægulvet. Doserings- og opsamlings-slanger blev placeret i en vis indbyrdes afstand, se skitse nedenfor.



**Figur 2** Placering af doseringsslanger (D) og opsamlingslanger (S) og de fiktive zoner.

Luftskiftet blev målt ved anvendelse af sporgasanalysator i følgende tre perioder **1:** 30/7-'97 kl. 12:15 til 2/8-'97 kl. 8:30, **2:** 24/3-'98 kl. 10:40 til 27/3-'98 kl. 8:00 og **3:** 30/3-'98 kl. 12:10 til 3/4-'98 kl. 9:00.

Udstyret blev indstillet til at dosere efter en konstant koncentration på 5 ppm, svarende til 30 mg/m<sup>3</sup>.

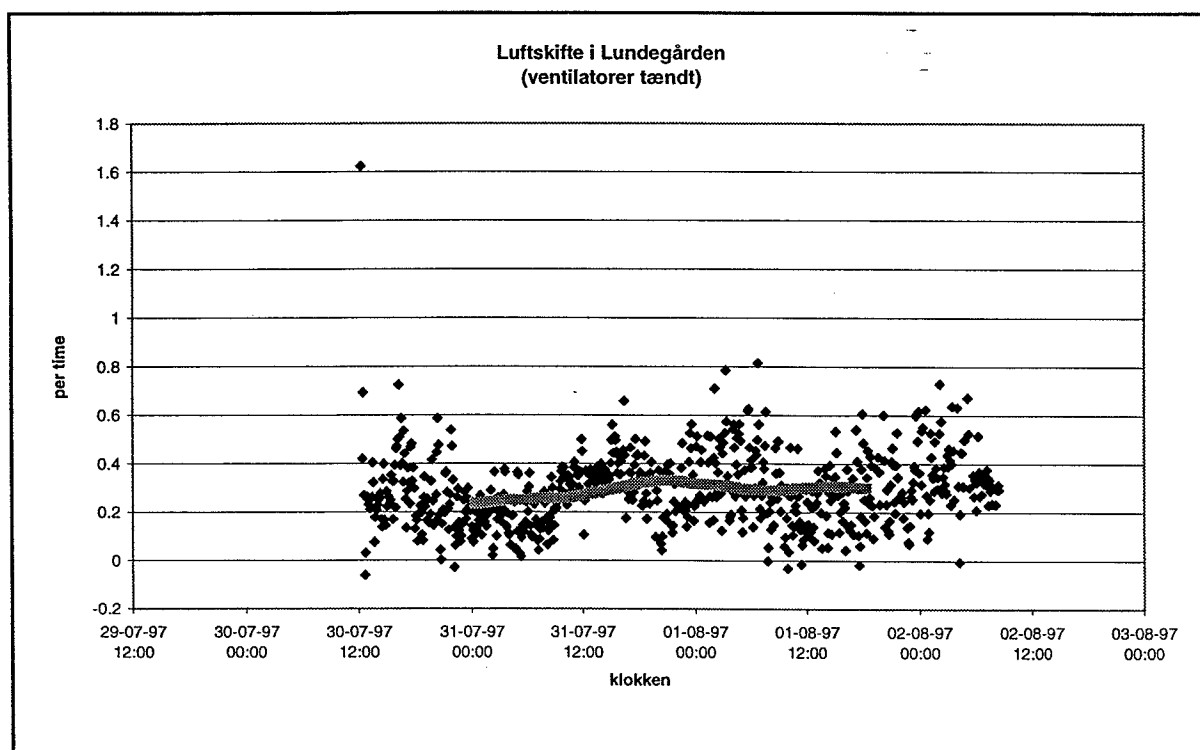
### 7.1.2 Resultater af sporgasmålinger

De opsamlede data i form af doseret gas omregnes af dataopsamlingsprogrammet til et

luftskifte  $\text{m}^3/\text{s}$ . De registrerede luftskifter med tilhørende måletidspunkt bearbejdes i regneark, med beregning af flydende gennemsnit og middelværdi.

Der er under målingerne i juli opstået problemer med kanal tre. Der er ikke registreret mængde af doseret gas eller målt koncentration for hhv. D3 og S3. Det antages at der ikke er fundet nogen dosering sted i D3, hvorfor gassen fra de andre doseringsenheder må antages at have fordelt sig jævnt. Den samlede doserede gasmængde for hele kryberummet skal derfor tages i forhold til hele kryberumsvolumenet.

Nedenstående graf viser måling, i 1. periode, af det gennemsnitlige luftskifte for hele krybekælderen på 0,3 gange i timen. Den optrukne linie er det bevægelige gennemsnit udregnet per døgn, således at døgnvariationen elimineres. Ved at benytte et løbende gennemsnit på 24 timer fjernes døgnvariationen, idet det beregnede luftskifte er et gennemsnitligt luftskifte for en periode på et døgn. Vindhastigheden blev i den pågældende periode målt til gennemsnitlig 0,8 m/s.



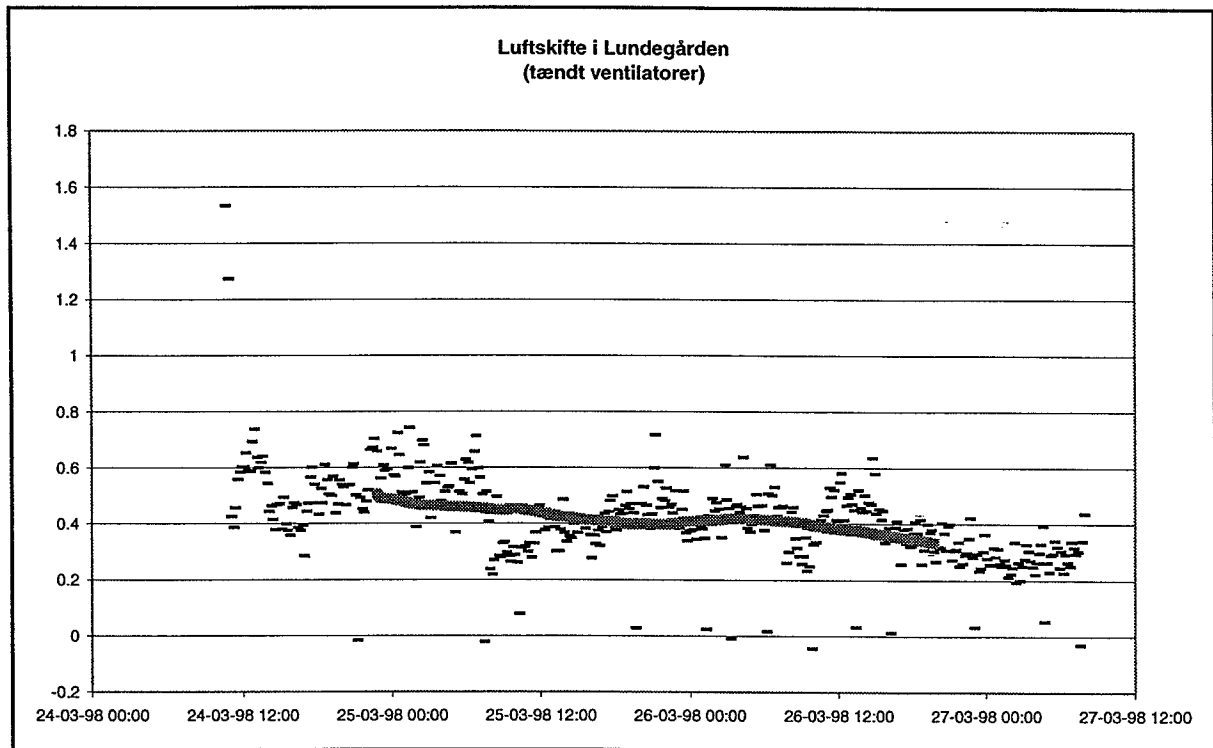
**Figur 3** Målte luftskifte og løbende gennemsnitlig luftskifte per 24 timer.

◆ : målt   ■ : beregnet løbende gennemsnit

Målingerne fra slutningen af marts 1998 (2. og 3. periode), fig. 4 og 5, viste et gennemsnitligt luftskifte på 0,42 gange i timen i 2. periode, hvor ventilatorerne var tændt. I 3. periode, hvor ventilatorerne var slukkede, var det gennemsnitlige luftskifte 0,46 gange i timen. Som ventet en forskel på 10%. Vindhastighederne var gennemsnitlig på hhv. 4,7 m/s og 5,2 m/s for 2. og 3. periode.

Resultaterne stemmer overens med teorien om at luftskiftet dels er drevet af en temperaturforskel og dels af et vindtryk. Den største temperaturforskel og de største

vindhastigheder for målingerne var i forårsperiode ved 2. og 3. måling, og dermed en forventelig større ventilation.

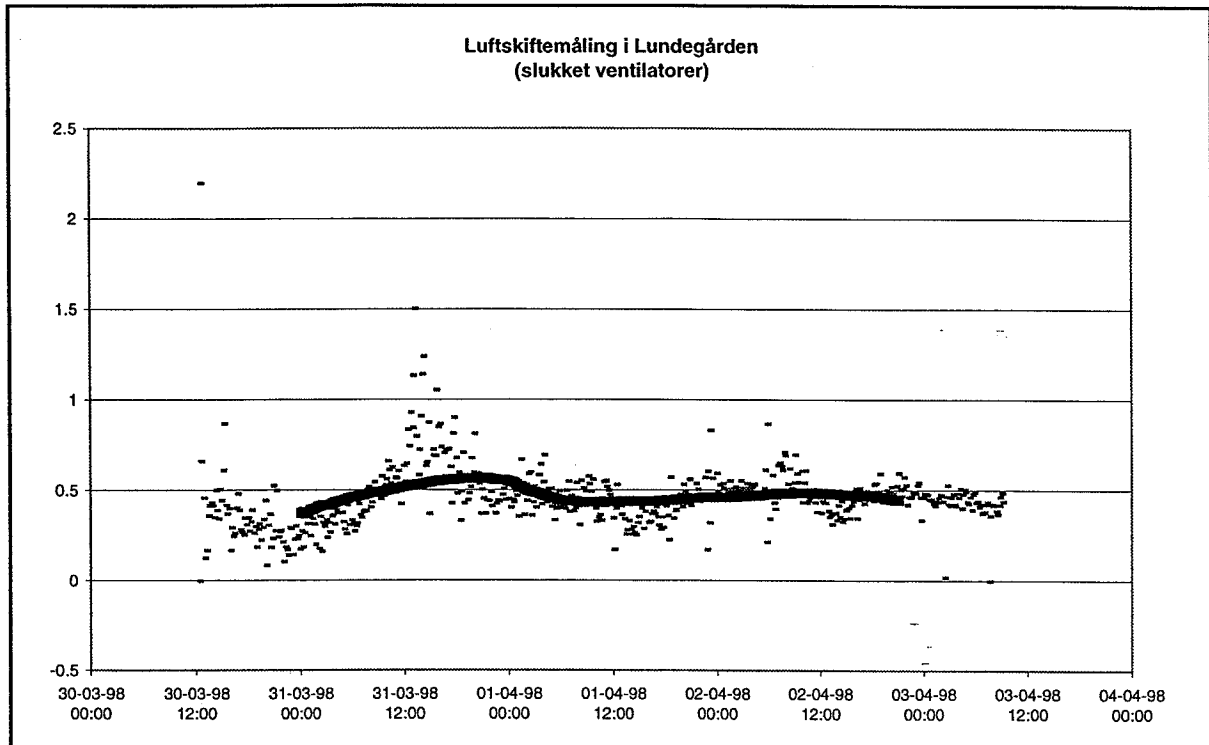


**Figur 4** Målte luftskifte og løbende gennemsnitlig luftskifte per 24 timer.

— : målt   ■ :beregnet løbende gennemsnit

Ovenover, fig.4, ses grafen af det gennemsnitlige luftskifte i krybekælderen for 2. måleperiode, der løb fra 24/3-'98 til 27/3-'98, hvor den gennemsnitlige vindhastighed var 4,7 m/s. Luftskiftet var svagt faldende igennem måleperioden, hvor den optrukne linie er det bevægelige gennemsnit udregnet per døgn.



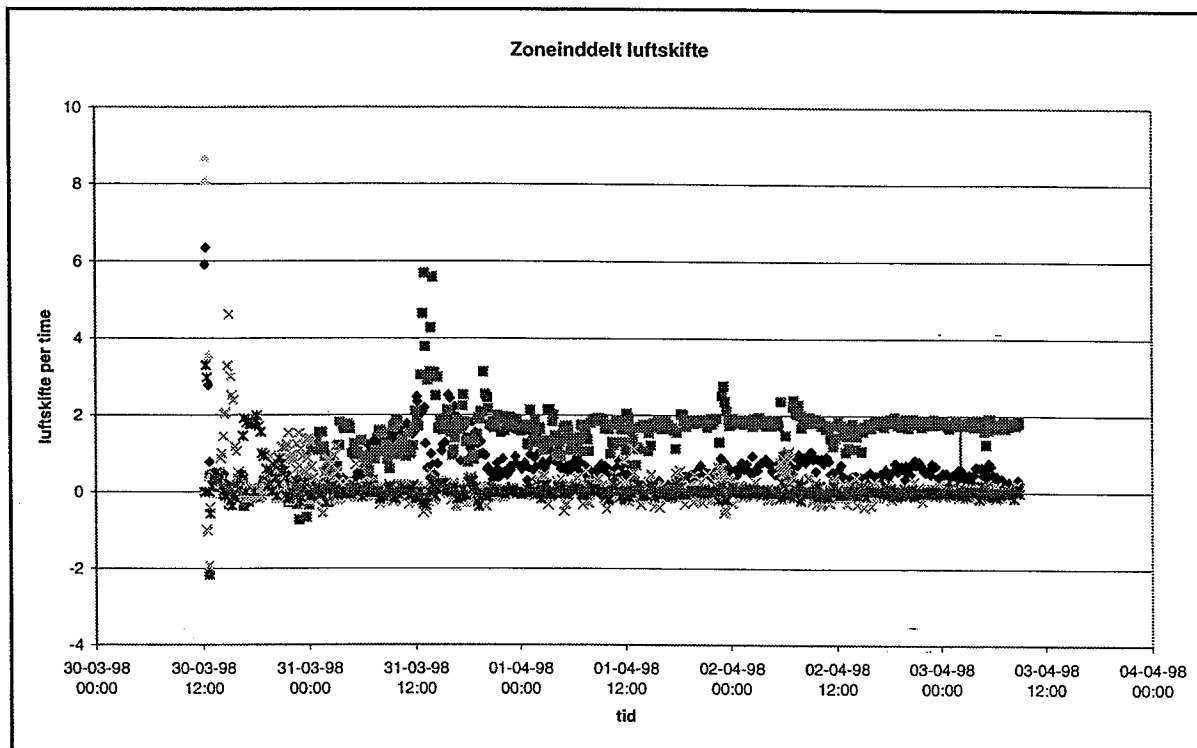


**Figur 5** Gennemsnitlige målte luftskifte i krybekælder for 3. måleperiode og løbende gennemsnitlig luftskifte per 24 timer.

— : målt    ■ :beregnet løbende gennemsnit

Det ses på fig.5, at luftskiftet er nogenlunde konstant med et lidt højere luftskifte omkring 31/3 kl 12 til 1/4 kl 00, efterfulgt af en periode med et lidt lavere luftskifte frem til 1/4 kl 21. Desuden er luftskiftet lavere end gennemsnittet i starten og slutningen af måleperioden.

Det undersøges om luftskiftet er jævnt fordelt på alle zoner.(Se zone-inddeling fig 2) I 3. måleperiode var ventilatoren slukket, hvorfor et forskelligt luftskifte imellem zonerne indikerer evt. stillestående luftlommer. Af grafen fig.6 ses, at der er et luftskifte på omkring 2 gange i timen for zone 2, mens det ligger på omkring 0,5 for zone 1. I de tre sidste zoner viser målinger et luftskifte omkring nul.



**Figur 6** Luftskifte målt i fem fiktive zoner for krybekælder

◆: zone 1   ■: zone 2   ▲: zone 3   x: zone 4   \*: zone 5

Resultaterne er overraskende fordi zone 5 med ventilationshullerne tilsyneladende har et luftskifte nær nul, mens zone 2 der ligger dirgonalt modsat zone 5, overfor zone 1 (med ventilation op i badeværelset) har det største luftskifte. Zone 3 kan i teorien have et luftskifte, selv om resultaterne viser noget andet, fordi luft der bevæger sig fra zone 5 til 1 (fra ventilationshuller fra det fri til badeværelsesventilationen) passerer zone 3, hvorfor der kan opretholdes et konstant koncentrationsniveau uden at tilføre gas. Dette ville dog forudsætte at der var et måleligt luftskifte i zone 5. Resultatet er et overraskende stort luftskifte i zone 2 og et forventeligt for zone 1. Derimod er luftskiftet overraskende lille for zone 5 og 3, mens det virker sandsynligt, at der kan være tale om en luftlomme i zone 4. De negative resultater stammer fra perioder, hvor der i en given zone ikke er doseret gas og samtidig målt en koncentrationsstigning.

Det konkluderes, at der er stor usikkerhed omkring de zoneinddelte resultater og at der ikke kan måles luftskifte indbyrdes imellem fiktive zoner, ved anvendelse af kun en type sporgas. Muligvis kan bedre resultater opnås ved samtidig anvendelse af flere forskellige sporgasser. Luftskiftemålingen af det totale luftskifte er på et forventeligt niveau, og skønnes at være i overensstemmelse med det faktiske luftskifte.

### 7.1.3 Sammenligning af målt og beregnet luftskifte

De målte luftskifter sammenlignes med et beregnet luftskifte. I DS-418 angives at kryberumsventilationen i  $\text{m}^3/\text{s}$  kan sædvanligvis sættes til 0,3 gange ventilationsåbningernes samlede areal i  $\text{m}^2$  under dimensionerende forhold. Det skønnes at ventilationen i højere grad

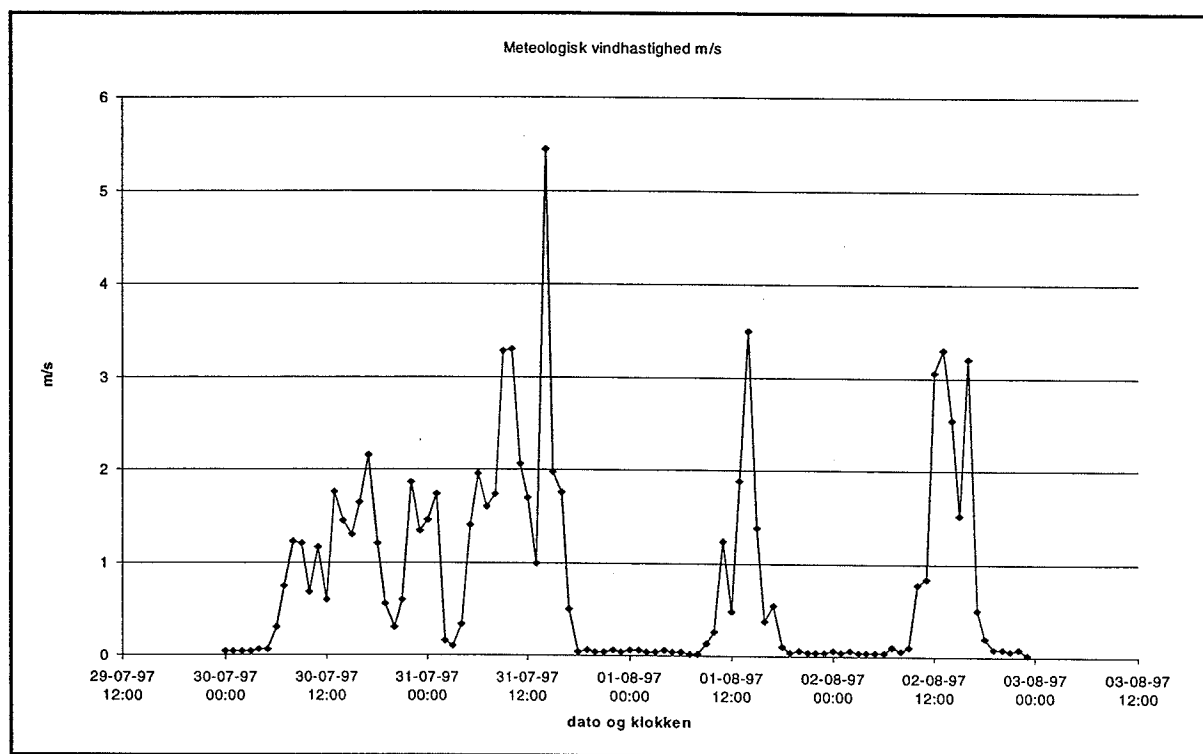
er domineret af vinden end af temperaturen, sådan at luftskiftet hele året kan antages at være af samme størrelsesorden, som beregnes ud fra ovenstående metode.

Ventilationsåbningerne består i et  $\varnothing 50$  mm og 2  $\varnothing 32$  mm huller i et af de tunge facadeelementer. Desuden er der ventilationsåbning fra krybekælderen op i badeværelset igennem 2 kanaler ( $\varnothing 100$  mm, skønnet). Der beregnes et luftskifte på  $0,1 \text{ time}^{-1}$ , hvis der ses på ventilationen igennem facadeelementet. Medtages ventilation igennem badeværelset, beregnes det samlede luftskifte for kryberummet til  $1,4 \text{ time}^{-1}$ .

De målte data viser at luftskiftet, på  $0,3 \text{ time}^{-1}$  se fig. 3, ligger på et forventeligt niveau. Det gennemsnitlige luftskifte for hele året kan dog godt afvige meget fra det målte. Det beregnede luftskifte er et gennemsnit, som ligeledes må tages med forbehold.

De målte luftskifter sammenholdes med lokale vejrdata for vindhastighed og vindretning i 1. måleperiode.

Vindhastigheden for måleperioden er på DTU bygn. 119 registreret til gennemsnitlig  $0,8 \text{ m/s}$ , hvilket er meget lavt (omregnet svarende til meteorologiske målinger 10 meter over jord og nulpunktskorrigeret).



**Figur 7** Korrigerede vindhastigheder målt på DTU.

Der har altså være tale om en periode med relativt stille vejr, idet årsgennemsnittet for TRY (test reference year, der indeholder typiske meteorologiske data for Danmark) ligger på  $4,9 \text{ m/s}$  og gennemsnit for juli og august er hhv.  $3,3$  og  $5,5 \text{ m/s}$ . [8] Det målte luftskifte i krybekælderen var som tidligere beskrevet  $0,3 \text{ time}^{-1}$ , for gennemsnitlig vindhastighed på  $0,8 \text{ m/s}$ .

### 7.1.4 Computersimulering af luftskifte i krybekælder

Med beregningsprogrammet Cics (Calculations In Crawl Spaces, udviklet af Olle Åberg fra Lunds Tekniska Högskola) [7], ønskes at regne på en tilsvarende kælder. For at opnå et luftskifte større end 0, forudsætter programmet udluftning i to forskellige sider. Den mindste hulstørrelse, der er mulighed for at vælge, er 71\*71 mm og kvadratisk. Det er altså ikke muligt umiddelbart at simulere den ønskede krybekælder. Med det mindste ventilationsareal opnås et årligt gennemsnitlig luftskifte på  $0,4 \text{ time}^{-1}$ . Teorien forudsætter altså ventilationshuller i to modstående sider og et større ventilationsareal, for at opnå et luftskifte, som det målte. Heraf konkluderes at der for Lundegården sker ventilation udenom de indbyggede ventilationshuller og -kanaler. Dette er ikke overraskende da gulvet ikke er tætnet, og der er ventilationskanaler fra kælder op i badeværelse, der igen udluftes gennem et loftsvindue, hvorved skorstenseffekten udnyttes til ventilation.

Vejrdatafilen sorteres efter vindretning og det tilhørende beregnede luftskifte (fra CICS) noteres.

Geografisk vindretning	Grader	CICS luftskifte
N	0-22	0,78
NØ	23-67	0,67
Ø	68-112	0
SØ	113-157	0,67
S	158-202	0,59
SV	203-247	0,67
V	248-292	0
NV	293-337	0,67
N	338-359	0,78

Det gennemsnitlige luftskifte, vægtet efter vindens fordeling på retninger, for 1. periode, kan nu findes til  $0,6 \text{ time}^{-1}$ . Dette er det dobbelte af det målte. Dette kan forklares med de meget små vindhastigheder i 1. måleperiode, som dermed har betydet lavere luftskifte end forventet.

De beregnede luftskifter benyttes derefter til simulering af temperatur og relativ fugtighed, som omtales senere i rapporten.

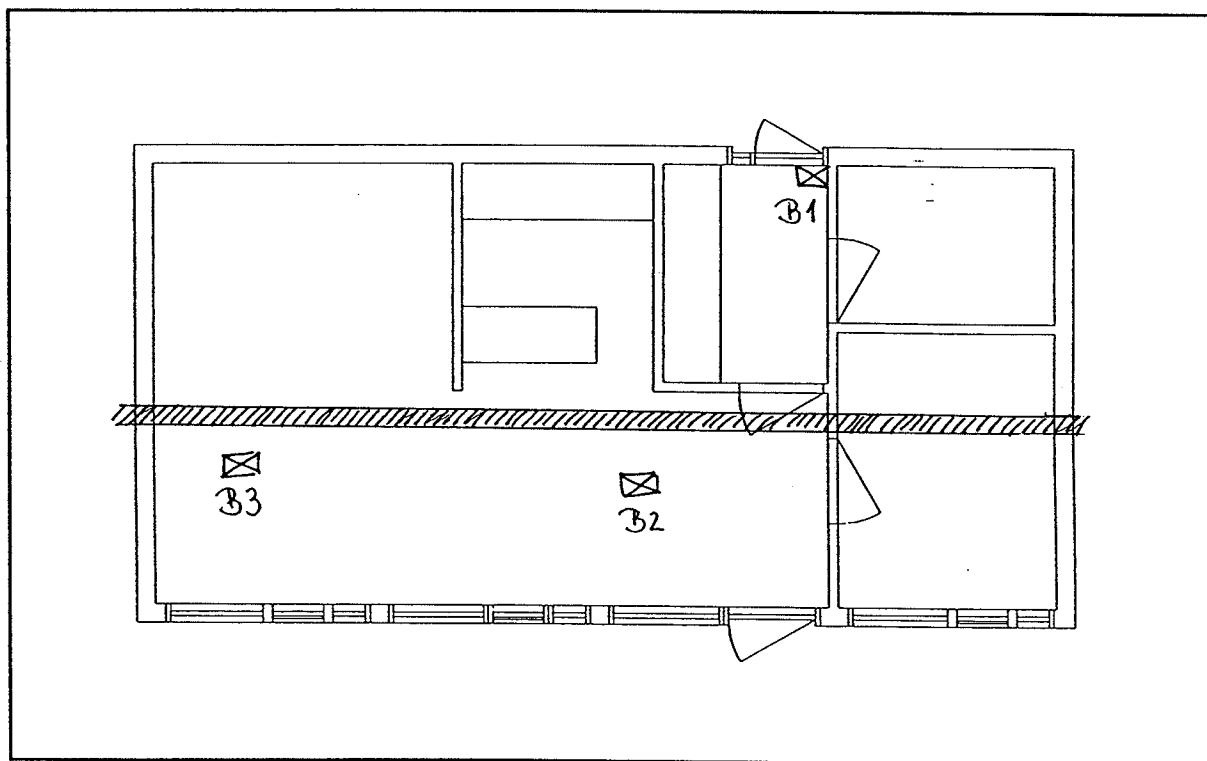
### 7.2 Måling af temperatur og relativ fugtighed

Der blev foretaget måling af relativ fugtighed og temperatur hvert 10. minut i forskellige målepunkter for en bolig. Desuden blev der taget kontrolmålinger i tilstødende boliger til

brug i tilfælde af overraskende måleresultater, så eventuelle fejlmålinger kunne elimineres. Målingerne blev udført af Birch & Krogboe ved Lars D. Christoffersen. Der blev anvendt datalogger og kalibrede følere til samtidig måling af temperatur og relativ fugtighed.

### 7.2.1 Instrumentering

Krybekælderen i Rævens Kvarter 55 er udstyret med tre følere (B1-B3), samt en oppe i boligen og en til registrering af temperatur og relativ fugtighed udenfor. Derudover er der som kontrol placeret en føler centralt i krybekælderen på nr. 56 og 57, samt en oppe i hver af disse boliger. De tre boliger er identiske, dog er nr. 56 beboet, mens de to andre boliger er tomme. På fig. 8 ses følernes placering i krybekælderen.



**Figur 8** Temperatur- og fugtfølernes placering i krybekælderen.

### 7.2.2 Resultater for måling af temperaturer

Der logges temperatur og relativ fugtighed, som gemmes i datafiler. Resultaterne for målinger i Rævens kvarter 55 bearbejdes i regneark, og de præsenteres som grafer for hver måned i bilagsrapport, og som månedsmiddelværdier i nedenstående skema.

**Tabel for månedsmiddeltemperatur i °C for Rævens kvarter 55.**

Kvartal	Måned	Ude	Køkken	Kælder 1 (B1)	Kælder 2 (B2)	Kælder 3 (B3)
2. '97	Juni	15,2	20,6	21,6	21,2	19,9
3. '97	Juli	18,6	22,2	21,5	21,9	20,5
	August	21,4	24,6	23,1	23,7	22,2
	September	13,8	21,1	22,7	22,5	20,9
4. '97	Oktober	7,7	19,6	23,7	22,0	20,5
	November	4,5	18,6	24,9	21,8	20,6
	December	2,3	17,8	25,0	21,5	20,3
1. '98	Januar	4,3	18,1	24,8	21,4	20,2

Det bemærkes at der over hele året er varmt i krybekælderen. Det er således varmere end i boligen, undtagen i den varmeste sommerperiode, hvor temperaturerne for krybekælder og bolig stort set er sammenfaldende. De tre målepunkter i krybekælderen viser en indbyrdes forskel. Målingerne i punkt B1 er højere end i de to andre punkter, hvilket skyldes at føleren sidder i nærheden af et varmerør til fjernvarme. Da temperaturen i B1 er højere end både ude- og køkkentemperaturen må temperaturudsvingene stamme fra en varmekilde. De sidste tre måneder af måleperioden fra november til januar ligger B1 næsten konstant omkring 25°C, hvilket stemmer overens med at det er et fjernvarmerør, og varmesæsonen er startet.

### 7.2.3 Resultater for måling af relativ fugtighed

For målinger i Rævens kvarter 55 sammenlignes de tre målte relative fugtigheder i kælderen, den relative fugtighed i boligen og den relative fugtighed udenfor. Den relative fugtighed i målepunkt 2 og 3 er stort set sammenfaldende i hele måleperioden, ligesom det var gældende for temperaturmålingerne.

**Tabel af månedsmiddelværdi for relativ fugtighed i % for Rævens kvarter 55.**

Kvartal	Måned	Ude	Køkken	Kælder 1 (B1)	Kælder 2 (B2)	Kælder 3 (B3)
2. '97	Juni	70,8	49,3	51,5	59,8	60,0
3. '97	Juli	68,0	52,8	59,4	65,8	66,3
	August	66,6	53,4	62,7	68,7	69,3
	September	72,0	50,5	54,9	62,9	64,5
4. '97	Oktober	79,1	45,8	44,4	54,8	56,4
	November	82,6	39,4	36,2	48,3	49,9
	December	85,1	37,1	32,0	45,3	46,8
1. '98	Januar	88,6	39,5	35,1	47,8	49,0

Den relative fugtighed i køkkenet og i punkt 1 følges ad, med den laveste relative fugtighed i boligen (køkkenet) fra juni til september. Den samme relative fugtighed i bolig og kælder i oktober og højst i køkken fra november til januar. At den relative fugtighed er lav i kælderen skyldes at temperaturen er højest i kælderen undtagen for juli og august.

Det kritiske fugtniveau for hvornår træ angribes af råd og svamp er ca. 85 % relativ fugtighed for rent træ og 72 % for tidligere angrebet træ. Det ses at fugtniveauet i krybekælderen igennem hele året holder sig langt under det kritiske niveau, hvilket kan forklares med de høje kældertemperaturer.

#### 7.2.4 Resultater for måling af absolut fugtighed i luften

Da det er svært at sammenholde relative fugtigheder ved forskellige temperaturer, sammenholdes de absolutte fugtindhold for herved at kunne skelne mellem, hvornår forskel i relativ fugtighed skyldes temperaturer, og hvornår det er grundet fugtindholdet.

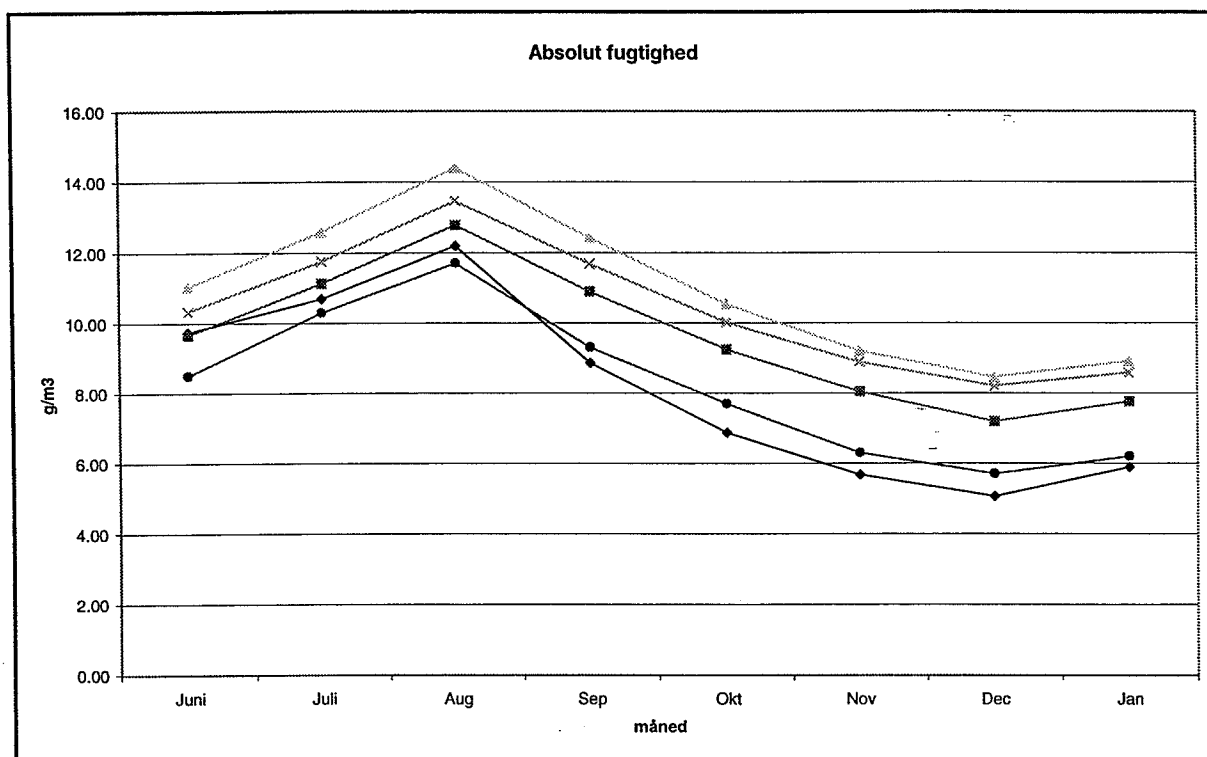
**Tabel af månedsmiddelværdi for absolut fugtindhold i luften i g/m<sup>3</sup> for Rævens kvarter 55.**

Kvartal	Måned	Ude	Køkken	Kælder 1 (B1)	Kælder 2 (B2)	Kælder 3 (B3)
2. '97	Juni	9,7	8,5	9,7	11,0	10,3
3. '97	Juli	10,7	10,3	11,1	12,6	11,8
	August	12,2	11,7	12,8	14,4	13,5
	September	8,9	9,3	10,9	12,4	11,7
4. '97	Oktober	6,9	7,7	9,3	10,6	10,0
	November	5,7	6,3	8,0	9,2	8,9
	December	5,0	5,7	7,2	8,5	8,2
1. '98	Januar	5,9	6,2	7,8	8,9	8,6

Som det ses af tallene og grafen fig. 9, er der forskel i fugtindholdet. Fugttilskuddet, i den ubeboede bolig, kommer fra krybekælders bund og vægge og fra fordampning fra WC'et. I sommermånederne, hvor man kunne forvente en eventuel opfugtning af krybekælderen med udeluften, er udeluften mere tør end krybekælderluften, hvorfor en ventilation vil virke udtørrende. Ud fra målingerne er det svært at afgøre hvor stor en del af ventilationen, der sker med udeluft og hvor stor en del der sker med luft fra boligen. I en beboet bolig vil der være en fugtproduktion, som øger fugtindholdet i luften, så hvis denne luft ventileres igennem kælderen vil fugtindholdet i kælderen kunne stige.

Den absolutte fugtighed for køkkenet er lavere end udeluftens absolutte fugtighed om sommeren, men højere om vinteren. Dette kan forklares med at materialerne i boligen optager fugt fra luften om sommeren, som derved udtørre indeluften. I vinterperioden er det absolutte fugtindhold i køkkenluften højere end udeluftens fugtindhold, men lavere end kælders. En

mulig forklaring er at om sommeren når temperaturen i køkken er højere eller omkring samme temperatur som i kælderen sker der ingen konvektion. Omvendt betyder de høje kældertemperaturer om vinteren at kælderluften cirkuleres op i boligen, hvorved fugtindholdet stiger. Om vinteren tilføres luften i boligen altså fugt, som dels frigives fra materialerne, men også fugt fra kælderluften.



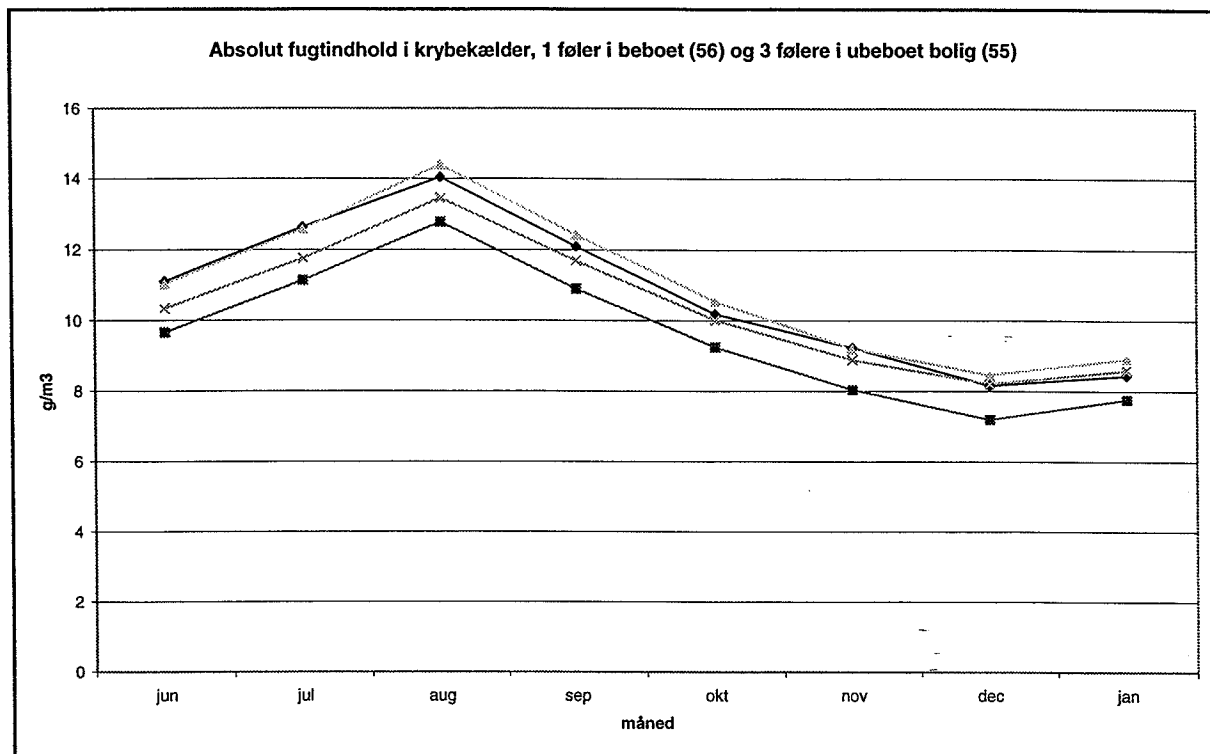
**Figur 9** Månedlige gennemsnitsværdier for Rævens kvarter 55.

◆: udeluft ■: krybekælder B1 x: krybekælder B2 ▲: krybekælder B3 ●: køkken

Den absolutte fugtighed og temperatur er hele tiden lavere udenfor end i krybekælderen, undtagen i juni hvor den er sammenfaldende med den absolutte fugtighed i B1. Der vil derfor ske en udtørring igennem hele året, når kælderen ventileres med udeluften. Såfremt der udveksles luft med boligen, vil den ligeledes virke udtørrende.

Der laves en sammenligning mellem det absolutte fugtindhold i bolig og kælder for den beboede bolig, Rævens kvarter 56, og den ubeboede bolig, Rævens kvarter 55. Dette gøres med henblik på at undersøge om beboelse har nogen indflydelse på fugtforholdene. Månedsmiddelværdierne for det absolutte fugtindhold sammenlignes for kælderen i fig. 10.

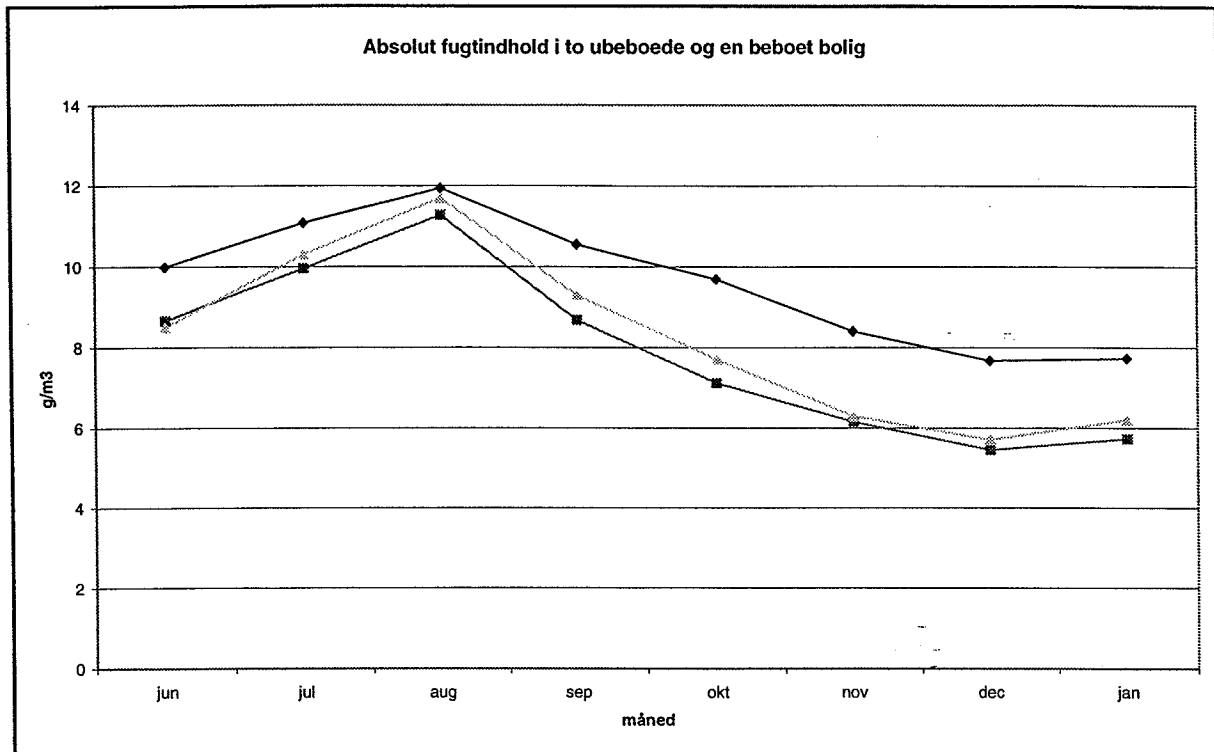




**Figur 10** Absolut fugtighed i kælder under beboet og ubeboet bolig. ♦: 56 ■: 55-B1  
▲: 55-B2 x: 55-B3

Heraf ses at fugtigheden i kælderen under den beboede bolig ikke adskiller sig fra fugtigheden i den ubeboede bolig.

Derimod viser fig.11 at fugtigheden i selve boligen er højere for den beboede end for den ubeboede bolig. Hvilket viser at der ikke er grund til at antage en væsentlig fugttransport fra bolig til krybekælder. En fugttransport fra kælder op i boligen, hvilket er mere relevant med de givne temperaturforhold, virker sandsynlig, da de kan forklare højere fugt i bolig end ude om vinteren, for den ubeboede bolig, og derfor ligeledes må antages at finde sted i den beboede bolig. Det højere fugtindhold i boligen stammer fra fugtproduktion som almindeligvis forekommer ved brug af en bolig.



**Figur 11** Absolut fugtindhold i boligens luft. ♦: Beboet bolig nr. 56 ▲: Ubeboet bolig nr. 55 ■: Ubeboet bolig nr. 57.

### 7.2.5 Delkonklusion for måleresultaterne

Ud fra de relative fugtigheder, ser det ud til at fugtigheden i køkken og i B1 påvirkes af udeklimaets variationer, da stigning og fald i den relative fugtighed ude og den relative fugtighed i boligen samt relativ fugtighed i B1 følges ad. Det må derfor antages, at der sker en vis ventilation i såvel kælder som bolig med udeluft. Det absolutte fugtindhold viser at der tillige sker konvektion af kælderluft op i boligen om vinteren, mens denne luftbevægelse er mindre betydelig om sommeren.

Niveauet for den relative fugtighed i både krybekælder og bolig er for alle måleperioder under de kritiske 82% rf, hvilket betyder at der ikke er fare for svampeangreb.

### 7.3 Simulering af krybekælders fugt- og temperaturforhold med Cics

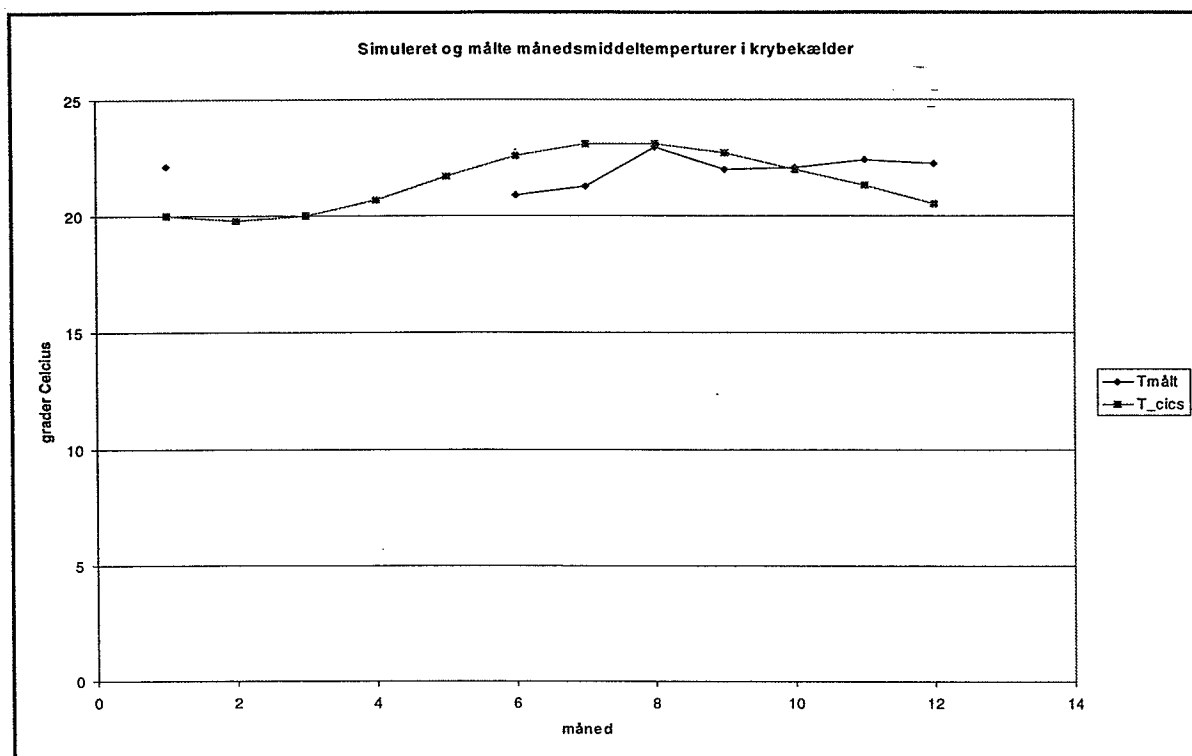
Til simulering af fugt- og temperaturforholdene i krybekælderen igennem et år anvendes programmet Cics. Ved brug af programmet er benyttet vejrdata fra referenceåret for Malmö, dvs. at temperaturen er bestemt i form af en sinuskurve over året. Denne er korrigeret med en approximation, som er udviklet af Anderlind [7], hvor korrektionsfaktorerne er tilhørende Malmö.

Modellen giver ikke mulighed for samtidig udlufts- og intern ventilation fra krybekælderen op igennem boligen, hvorfor der ses bort fra ventilationshullerne fra krybekælder op i badeværelset. Som tidligere beskrevet er det valgt at benytte to kvadratiske ventilationshuller

71 \*71 mm placeret i modstående sider til simulering af et luftskifte, der bedst muligt ligner det, der er målt ved anvendelse af sporgasteknik.

Næste trin er at få en rimelig overensstemmelse mellem simulering og måling af temperaturerne i krybekælderen. Krybekælderen i Lundegården modtager en del varme fra varmforsyningsrør, varmtvandsbeholder og i opvarmningsperioden også et øget tab fra radiatorrør, der føres uisolerede i kælderen. I Cics kan der ikke defineres en varmekilde, hvorfor varmetilskuddet simuleres ved at hæve boligens temperatur. Boligens temperatur angives som en konstant temperatur over hele året, hvilket ikke er en særlig god repræsentation af varmekilden, hvis tilskud vil være mindre uden for opvarmningssæsonen.

Med en konstant indendørs temperatur på 27°C og U-værdi for krybekælderdek på 5 W/m<sup>2</sup>K, samt U-værdi for krybekældervæggene på 0,5 W/m<sup>2</sup>K opnås et simuleret temperaturforløb i nærheden af det målte, se fig. 12.



**Figur 12** Månedsmiddeltemperaturer målt og simuleret for en krybekælder i Lundegården.

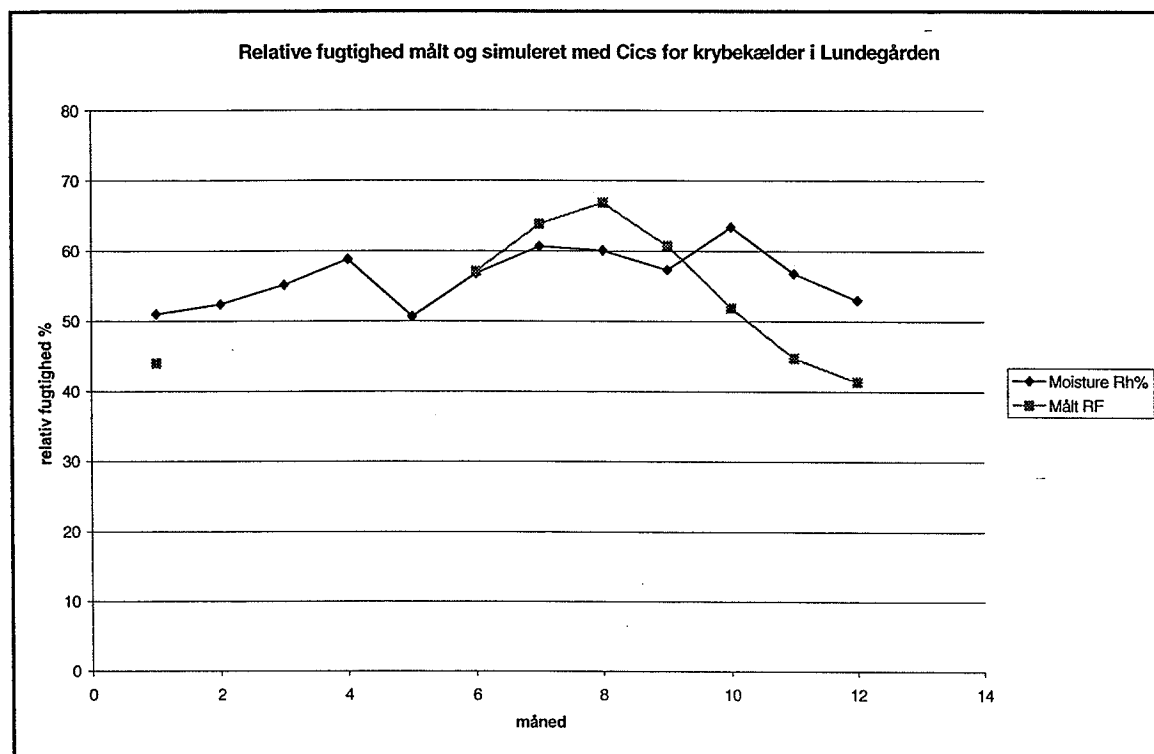
De mest kritiske perioder for fugt i en ventileret krybekælder er i sommer- og efterårsperioderne, da den relative fugtighed i udeluften er høj og temperaturen i krybekælderen typisk er lavere end udetemperaturen. Derfor er det ud fra et fugtsynspunkt vigtigst, at der er overensstemmelse mellem de målte og simulerede temperaturer i denne periode.

Den relative fugtighed for krybekælderen simuleres ud fra nogle parametre vedr. fugttilskud. Der er mulighed for at angive et fugttilskud fra såvel bolig som fra krybekælderbund. Tilskud til bolig har ikke nogen væsentlig effekt på fugtforholdene i krybekælderen, når der ikke

simuleres luftgennemgang imellem bolig og krybekælder. Det angives hvilken type af fugtspærre, der er placeret mod jord og hvor stort et procentvist areal den dækker. For det frie areal angives hvor mange procent, der er tørt og hvor mange procent, der er vådt. For det våde areal skal desuden angives et fugttilskud fra jord i  $\text{kg/m}^2\text{h}$ .

I den bolig, der skal simuleres, er der ingen beboere og der simuleres uden luftgennemgang mellem bolig og kælder, hvorfor det antages at der ikke er noget fugttilskud fra bolig. Ved at simulere uden fugtspærre mod jord på 10% af arealet og PE-folie over 90%, og antage det våde og det tørre areal på hhv. 1% og 9%, opnås en variation af den relative fugtighed af samme størrelsesorden som den målte, ved at sætte fugttilskuddet fra fugtig jorden til krybekælderrummet til  $70 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2\text{h}$ , fig. 13.

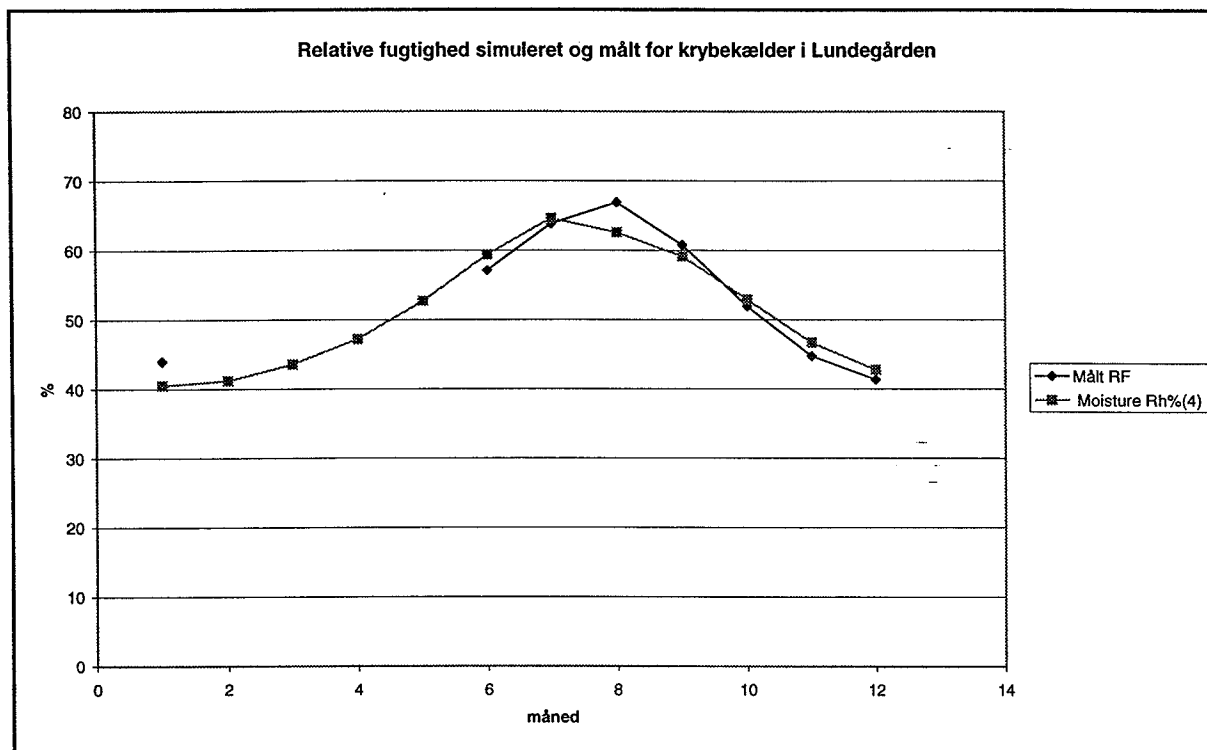
Fugttilskuddet på  $70 \text{ g/m}^2\text{h}$  er beregnet ud fra følgende forudsætninger. Hvis det antages at luftens gennemsnitlige temp og relative fugtighed er  $22^\circ\text{C}$  og 54%, og jorden har en gennemsnitstemperatur på  $8^\circ\text{C}$  og relativ fugtighed på 90%. Overgangstallet for damptransport fra jord til luft sættes til  $2,8\text{E-}3 \text{ m/s}$  [9], fås en fordampning på  $70 \text{ g/m}^2 \text{ h}$ .



**Figur 13** Beregning af relativ fugtighed med 90% PE-folie, 1% vådt uden fugtspærre og 9% tørt uden fugtspærre. Fugttilskuddet fra jord  $0.07 \text{ kg/m}^2\text{h}$ .

Simuleringsresultaterne stemmer ikke tilfredsstillende overens med de målte relative fugtigheder, figur 13. De knæk der sker på simuleringskurven kunne tyde på at programmet laver nogle numeriske fejl, da en mere jævn kurve må forventes.

Foretages simuleringen i stedet med et dækket areal på 20% og åbent areal på 80%, hvoraf 75% er tørt og 5% er vådt og fugttilskuddet sættes til  $5 \text{ g/m}^2\text{h}$ , fås resultater som angivet i kurven figur 12. Hvilket giver tilfredsstillende overensstemmelse mellem målt og simuleret luftfugtighed, fig. 14.



**Figur 14** Beregning af relativ fugtighed med 20% PE-folie, 5% vådt uden fugtspærre og 75% tørt uden fugtspærre. Fugttilskuddet fra jord  $5 \text{ g/m}^2\text{h}$ .

Ved at øge fugttilskuddet fra fugtig jord til krybekælderrummet, sker der ingen markant stigning i risikoen for mugdannelse, fordi det våde areal udgør kun 5%. Ud fra de beregnede relative fugtigheder og temperaturer angiver Cics en procentvis risiko for mugdannelse for hver af årets 12 måneder. Med de viste data er der ikke risiko for fugtskader, hvilket stemmer overens med de observationer, der er foretaget ved inspektion og under arbejde i den pågældende krybekælder.

#### 7.4 Ventilationens påvirkning af den relative fugtighed

Det undersøges hvilken indflydelse ventilationen har på den relative fugtighed i krybekælderen ved at simulere med Cics med forskellige ventilationsarealer. Herunder medtages en simulering uden ventilation.

Der laves simuleringer hvor antallet og arealet af ventilationshullerne varieres, mens øvrige inputparametre fastholdes.

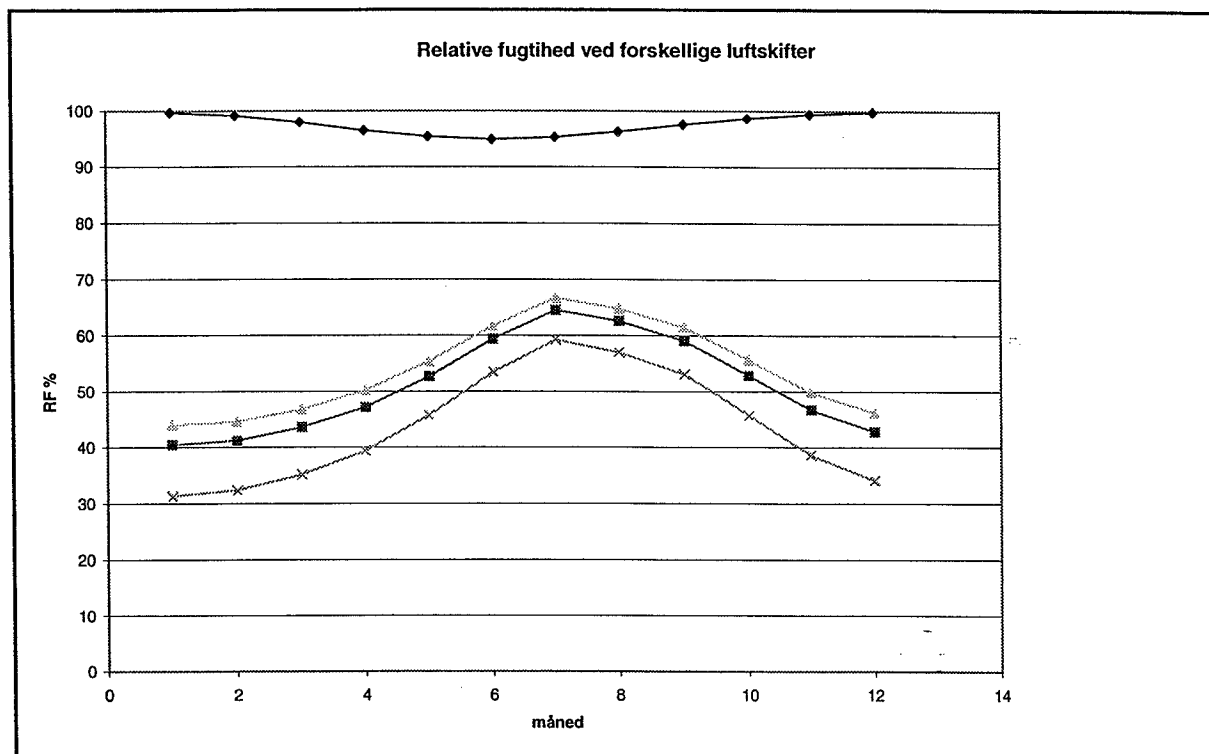
#### Variation af ventilationsareal:

Cics-model	Antal ventilations-åbninger	Placering i facade N-Ø-S-V	Areal per åbning i cm <sup>2</sup>	Gennemsnitlig luftskifte per time
1	0	0-0-0-0		0,005
2	3	2-0-1-0	50	0,413
3	2	1-0-1-0	156	0,326
4	4	2-0-2-0	156	1,056

I Cics-model 1 er lavet en model uden ventilation. Model 2 har et gennemsnitlig luftskifte der svarer til det aktuelle. Model 3 er det mindste åbningsareal (der er muligt at definere i Cics), der giver ventilation større end luftskiftet for en uventileret krybekælder. Hvis åbningerne er placeret i samme side, eller hvis der kun er én åbning, beregner Cics et luftskifte svarende til "ingen ventilation". I model 4 er anbefalingerne fra SBI-anvisning 178 for en kold krybekælder fulgt. Hvilket vil sige, at der er en maksimal afstand mellem åbningerne på 6 meter, og hver åbning har et areal på minimum 150 cm<sup>2</sup>. Med de begrænsninger der ligger i Cics betyder det, at der placeres to ventilationshuller (125\*125 mm) i hhv. nord- og sydfacaden.

Det bemærkes at uden ventilationshuller, Cics-model 1, forekommer der et luftskifte forskellig fra 0. Hvilket ikke har nogen naturlig forklaring og må tillægges unøjagtighed i programmet.

Krybekælderen blev oprindelig opført som en varm krybekælder, hvorfor centralvarmerør, radiatorrør og varmtvandsbeholder befinder sig i krybekælderen. Isoleringsgraden for vægge og gulv opfylder dog slet ikke hvad man i dag kræver for en varm krybekælder. Faktum er at der er et betydeligt varmetilskud til kælderen fra de nævnte installationer, hvorfor temperaturen i krybekælderen hele tiden må forventes at være højere end udetemperaturen. Herved er der ikke fare for sommerkondens, som følge af for megen ventilation. For en varm krybekælder, udført som i Lundegården, er det nødvendigt med et vist luftskifte for at fjerne den fugt der uundgåeligt fordamper fra undergrunden og tilføres fra kældervægge. Som det ligeledes fremgår af grafen fig. 15, vil den uventilerede krybekælder opnå uacceptable høje relative fugtigheder.



**Figur 15** Simuleret relativ fugtighed med Cics for forskellige luftskifter.

◆: 0,005 h<sup>-1</sup>, ▲: 0,326 h<sup>-1</sup>, ■: 0,413 h<sup>-1</sup>, x: 1,056 h<sup>-1</sup>

Med minimal ventilation på 0,326 time<sup>-1</sup> er der tilstrækkelig ventilation til at fjerne den overskydende fugt, se fig. 15. Dette luftskifte er mindre end det målte. At der alligevel er fundet problemer med for megen fugt i mange af Lundegården krybekældre er forårsaget af at undergrunden og den afgivne mængde fugt er forskellig rundt omkring i bebyggelsen. Simuleringerne viser at med den tilførte fugtmængde, der er aktuel for det målte hus kunne man reducere ventilationen uden at der skulle opstå mugdannelse og andre fugtproblemer.

Efter renovering, vil krybekældrene fremstå som velisolerede varme krybekældre. Her er varmetabet fra ventilation ikke så markant, men der er risiko for et problem med kondens og høj relativ fugtighed i sommer- og efterårsperioden, hvor udeluften er varm og fugtig, mens krybekælderluften er relativ kold. Herved opstår der en risiko for høj relativ fugtighed i længere perioder, der kan give fugt- og mugproblemer. Der opretholdes et nødvendigt minimalt luftskifte, der sikrer at den relative fugtighed holdes på et tilfredsstillende niveau om vinteren. Samtidig med at dette luftskifte ikke overskrider et kritisk maksimalt luftskifte, hvor der er risiko for for megen fugt i sommer- og efterårsperioden.

## 8. Konklusion

Målinger af luftskiftet har vist en tilstrækkelig ventilation grundet den skorstenseffekt, der udnyttes ved ventilation fra kælderen op igennem badeværelses ovenlysvindue. I hht. SBI-anvisning 178 er ventilationen igennem de tre åbninger i facadeelementet i nordsiden utilstrækkelig, hvis ikke ventilationen igennem badeværelset medregnes. Med den målte ventilation og de registrerede temperatur- og relative fugtforhold i krybekælderen viser tilsvarende simuleringer med Cics at fugtforholdene for hele året er tilfredsstillende. Dette stemmer overens med inspektion i krybekælderen.

Fugtproblemer i andre boliger i Lundegården stammende fra krybekælderen må tillægges de meget varierende jord- og bundforhold med tidligere moseområder, og ikke krybekælderkonstruktionen generelt. Det skal dog tilføjes at en krybekælderkonstruktion må forventes at kunne modstå en vis variation af bundforholdene, uden at der her er taget stilling til hvad dette indebærer.

Den undersøgte krybekælder er altså fint funktionsdygtig med de givne bundforhold ved forsøgshusene, men har et utilfredsstillende højt varmetab pga. den ringe isolering. Efter renovering, hvor man isolerer krybekælderen, skal der tages hensyn til den risiko, der ligger i høje relative fugtigheder i sommer-og efterårsperioden ved kraftig ventilation.



## 9. Litteraturliste

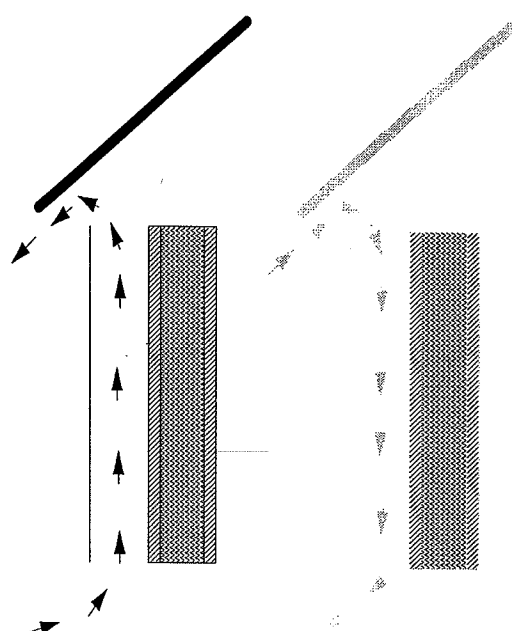
- [1] BUR, 1989. Erik K. Jørgensen A/S. Rådgivende Ingeniører F.R.I.:BUR rapportering. Fugtforhold i varme krybekældre.
- [2] SBI, 1993. Andersen, Nils E.;Christensen, Georg; Nielsen, Fleming: Bygningers fugtisolering. SBI-anvisning 178.
- [3] Polyteknisk forlag, 1970. Nissen, Henrik: Modul og montagebyggeri.
- [4] Birch & Krogboe, 1996. Byggeteknisk gennemgang og mikrobiel indeklimaundersøgelse af Lundegården I i Ballerup, feb.
- [5] Teknisk forlag, 1967. Christensen, Georg og Lohse, Uwe: En ny kryberumskonstruktion.
- [6] Åberg, Olle: Uteluftventilerad kryprumsgrund. En studie af ventilation, temperatur, fukt och mögel. Tekniska Högskolan i Lund. Byggnadsfysik. Arbetsrapport 1995-02-25.
- [7] Åberg, Olle: Cics - Kryprumsgrunder. Ventilation, temperatur, fukt og mögel. Beregningsprogram för PC. Hjälpmedel för fuktdimensionering. Byggteknik Olle Åberg AB. 1997-01-07.
- [8] SBI, 1982. Andersen, Bo et al.: Vejrdata for VVS og energi. Dansk referenceår TRY. SBI-rapport 135.
- [9] Nielsen, Anker: Fugt II. 2.udgave. DtH, Laboratoriet for Varmeisolering, 1980.
- [10] Domina: Rapport vedr. Lundegården I. Fugtundersøgelse i gårdhusbebyggelsen gennemført i perioden september 1994 -maj 1995. Sag nr. 1797.59

# Appendix B

Jævn dosering af sporgas i vandret plan på ventileret lodret spalte

# Jævn dosering af sporgas i vandret plan på ventileret lodret spalte.

CHARLOTTE GUDUM



SAGSRAPPORT  
**SR-0019**

2000

ISSN 1396-402X

INSTITUT FOR BYGNINGER OG ENERGI  
DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET



## 1 Indledning

Til brug for forsøg til bestemmelse af lufthastighed i en ventileret spalte anvendes sporgas. Sporgassen skal doseres jævnt i et vandret plan vinkelret på strømningsretningen. Doseringen sker via T-stykke i midten af en 0,559 m bred spalte. Nærværende rapport beskriver forsøg med dosering igennem slange udført med forskellig perforering til opnåelse af jævn dosering på langs af slangen.

## 2 Forsøgsopstilling

På en lodretstående sortmalet plade udspændes en snor mellem to øskner til brug for ophængning af slange. To stykker slange à 280 mm er samlet vandret med et T-stykke, hvor der er mulighed for tilførsel af luft igennem det tredje ben.

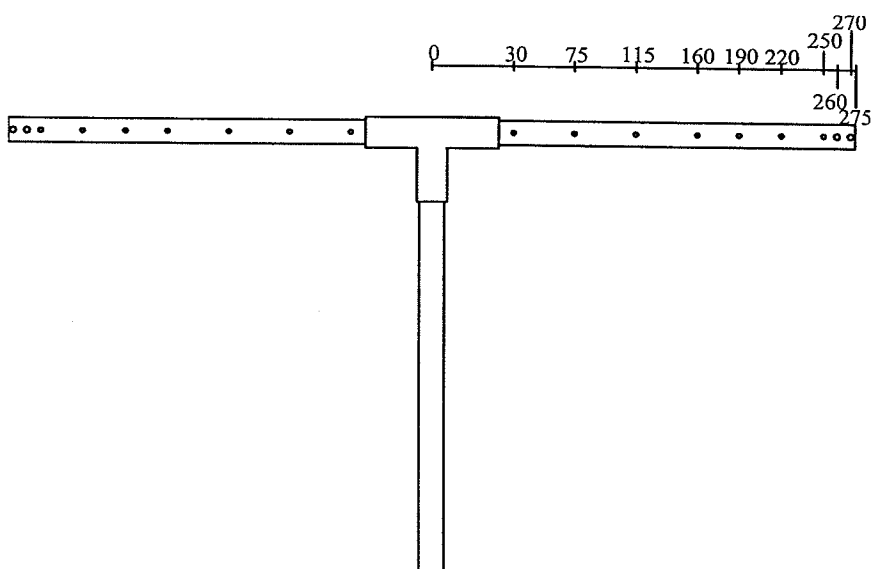
Der er boret identiske huller i de to stykker slange, der er lavet i teflon med en indre diameter på 3 mm og godstykkelse på 0,5 mm. De to stykker er begge lukket i den ene ende og tilsluttet T-stykket i den anden.

Slangen, der benyttes til tilførsel af luft, er med lufttæt tilslutning forbundet med et røgudviklende rør, reduktionsventil og trykluft. Det benyttede røgudviklende rør aktiveres når enderne knækkes af og luft blæses igennem røret. Herved oxideres stoffet i røret og der udvikles en hvid røg.

Opstillingen er placeret under kraftigt udsug, som slukkes i korte perioder under forsøgene.

## 3 Udførelse af forsøg

Røgfyldt luft blæses igennem tilførselsslangen, T-stykket og ud i de hullede slanger ved at åbne let for reduktionsventilen. Der gennemførtes 5 prøver. Slangerne og røgen blev fotograferet for prøve 1-5, som beskrevet nedenfor. Udsuget over forsøgsopstillingen var tændt for prøve 1-4 og slukket for prøve 5.



Figur 1 To stykker slange forbundet med T-stykke. Hullernes areal og indbyrdes afstand er varierende.

Prøve nr. 1 var lavet med 1 mm huller, boret igennem slangens to sider, med en indbyrdes afstand på 5 mm

Prøve nr. 2. Hvert andet hul blev tapet til på den inderste tredjedel, den midterste del var uændret og i den yderste tredjedel på begge slanger blev hullerne boret ud med 2 mm bor

Prøve nr. 3. Det blev besluttet at lave en ny slange (hvor der kun blev boret igennem ene slangevæg), og først prøve med den ene side, og bagefter kopiere denne. Det første hul, med diameter 1 mm, placeres 30 mm fra tilslutningsstykkets midte. Med indbyrdes afstand 45 mm laves et 1 mm hul yderligere 3 gange. Derpå et 1 mm huller med en indbyrdes afstand på 30 mm 3 gange. Med en 10 mm afstand laves 2 huller med diameter 2 mm. Enden lukkes ved sammensmeltning 5 mm efter sidste hul. Alle huller er kun boret igennem den ene væg i slangen.

Prøve nr.4. To slanger som beskrevet under prøve nr.3 tilsluttes T-stykket.

Prøve nr. 5 identisk med prøve nr.4 men udsug er slukket under forsøg.

#### 4 Resultater

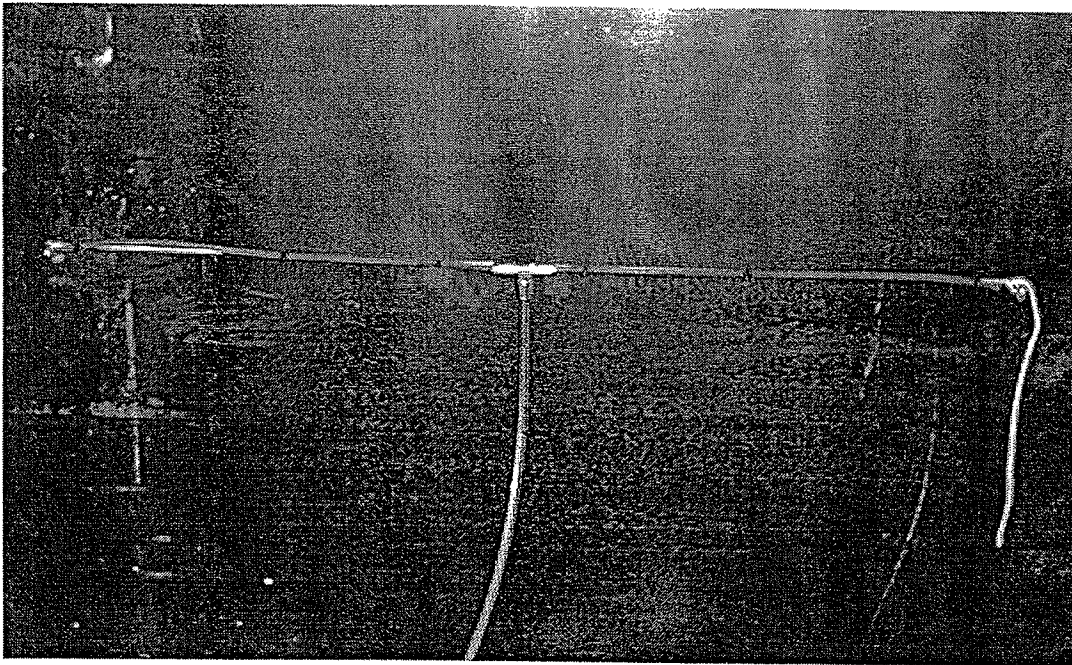
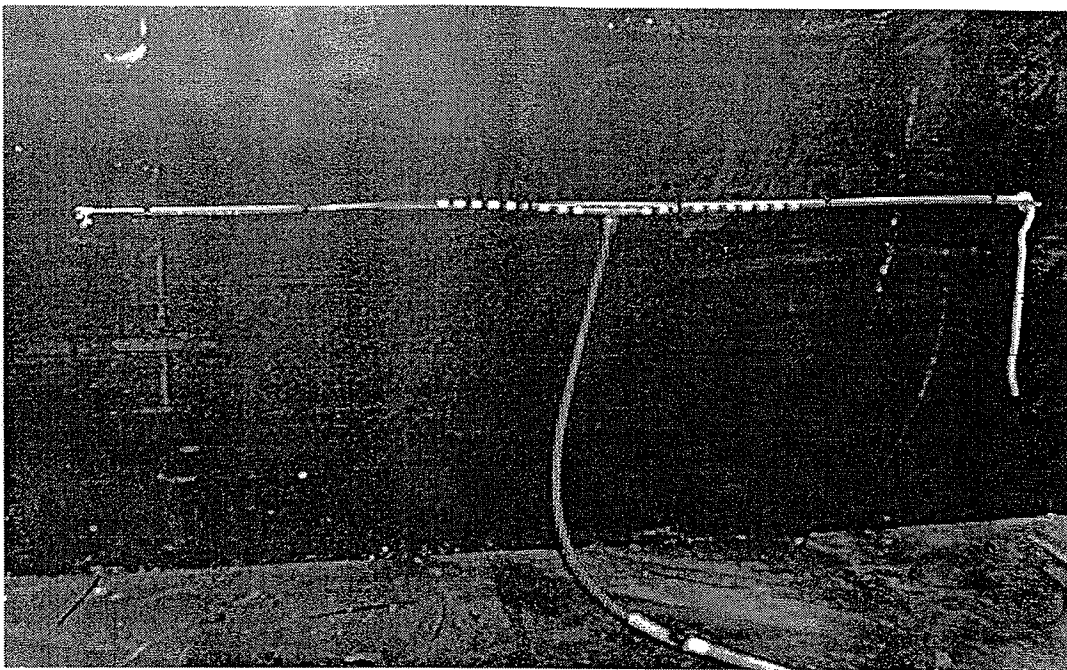
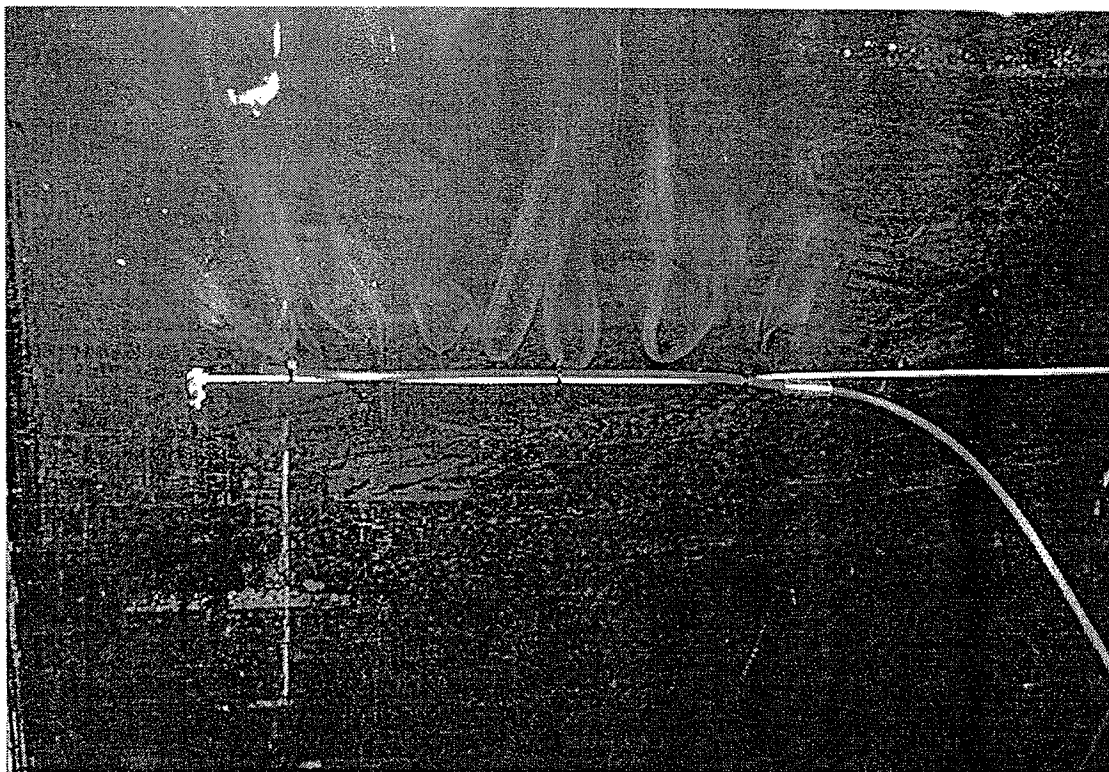


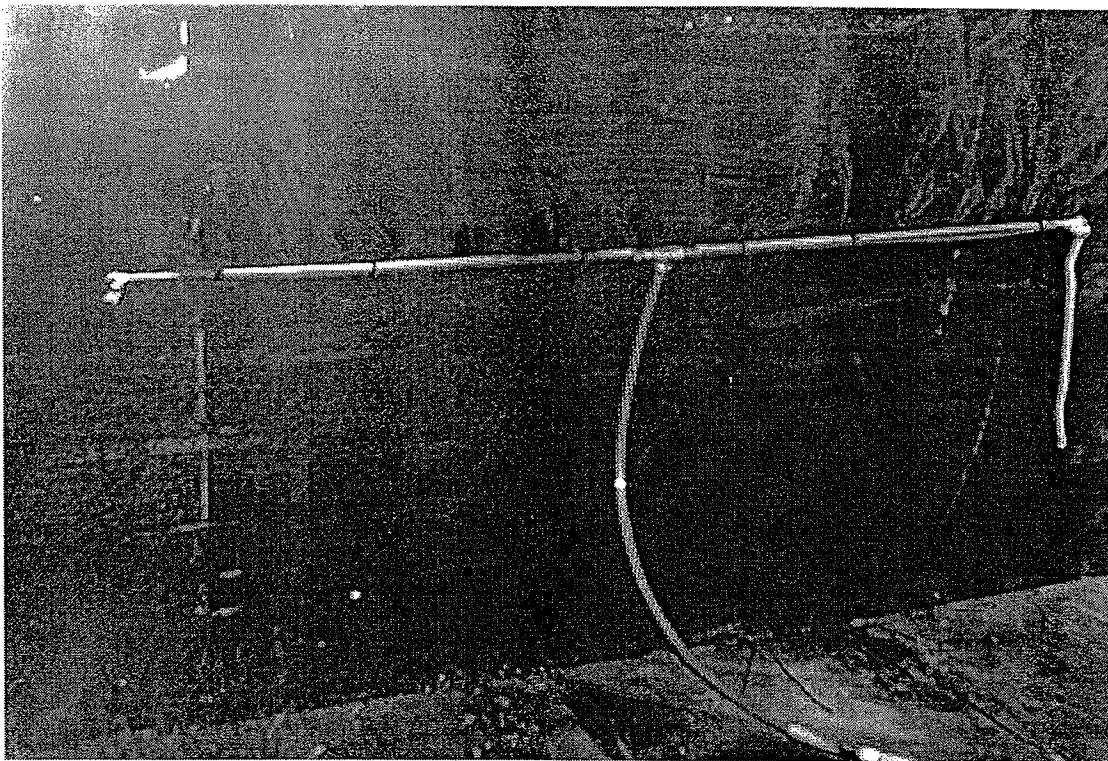
Foto af prøve 1. ovenfor viser at røgen kommer ud igennem en tredjedel af hullerne nærmest T-stykket. Den manglende symmetri omkring midten tillægges påvirkning fra et skævt sug over pladen. Dosering igennem denne slange er ikke tilfredsstillende.



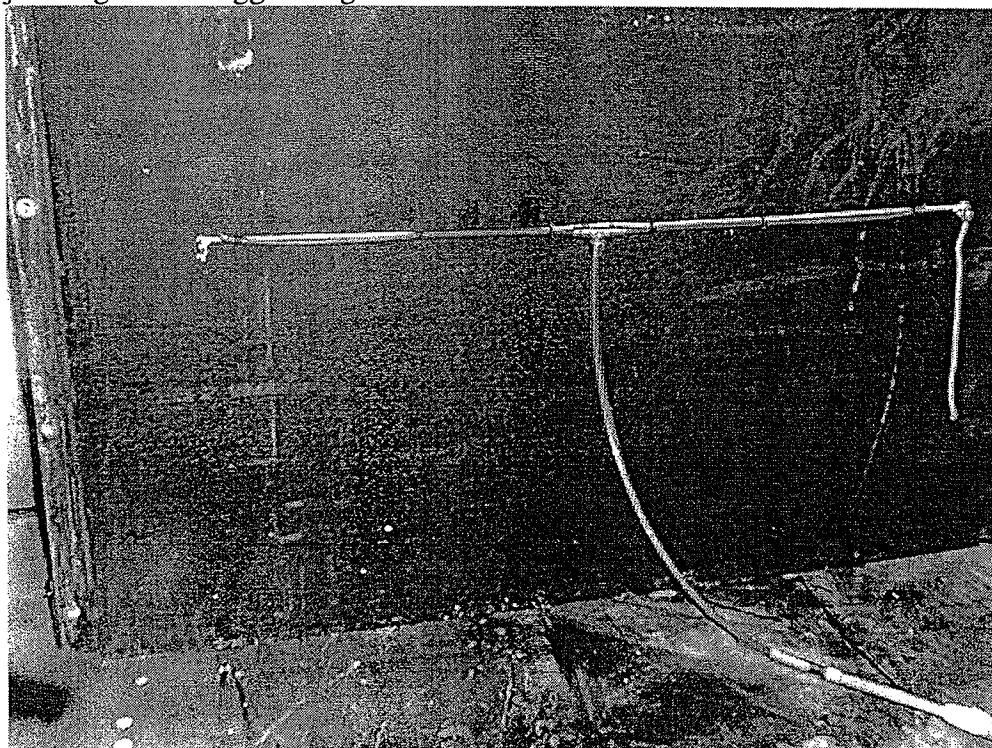
Prøve 2 ovenfor viser ikke forskel fra prøve 1. Stadig kommer røgen ud igennem den inderste tredjedel.



Prøve 3 ovenfor viser at røgen kommer ud jævnt fordel i hele slangens længde og tilfredsstillende kravet om jævn dosering.



Prøve 4 viser at når to slanger som prøve 3 samles med T-stykke, fordeles røgen tilfredsstillende jævnt igennem begge slanger.



Prøve 5 ovenfor viser slange identisk med prøve 4, men hvor udsuget over forsøget kortvarigt er slukket.. Det viser stadig en tilfredsstillende fordeling af røgen.

## 5 Usikkerhed og fejlkilder

Sporgas i form af lattergas, som siden hen tænkes anvendt, har en anden kemisk sammensætning end den anvendte røg, og dermed er de enkelte røgmolekyleres volumen og massefylde forskellig fra lattergas. Mængden af luft der blæses igennem forsøgene med røg er meget større end den konstante dosering på ca. 0,5 ml/s, som sporgassen skal doseres med.

Den benyttede røg kan ikke ses, når der benyttes lavere flow end det anvendte, ligesom at det ikke har været konstant under de 5 forsøg. Det antages at molekylestørrelsen for både røg og lattergas er lille i fht. areal af slangens tværsnit og hullernes areal, så det ikke har væsentlig betydning.

Ligeledes antages den jævne fordeling at være uafhængig af det påførte tryk, så at doseringen kan antages at være jævnt fordel langs slangen, uanset at dette ikke kan observeres visuelt med røg.

## 6 Konklusion

På baggrund af forsøg med røg konkluderes at sporgas kan doseres jævnt, i bredden 559 mm, langs en slange med huller med størrelse og placering som prøve nr.3. Dvs. 30 mm fra T-stykkets midte laves et 1 mm hul. I en afstand 45 mm og med indbyrdes afstand 45 mm laves yderligere 3 gange 1 mm huller. I en afstand 30 mm 1 mm huller med en indbyrdes afstand på 30 mm 3 gange. I en afstand 10 mm og med en 10 mm indbyrdes afstand laves 2 huller med diameter 2 mm. Enden lukkes ved sammensmeltning 5 mm fra sidste hul. Disse huller er kun boret igennem den ene væg i slangen.



# Appendix C

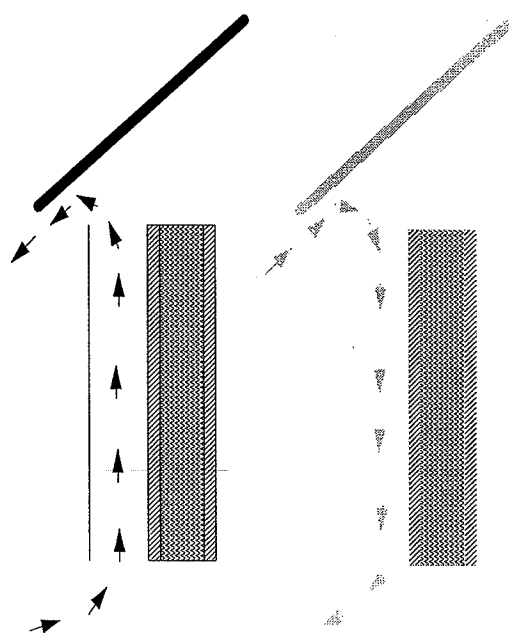
Måling af lufthastighed i ventileret spalte på lodret facade ved brug af sporgas

# Måling af lufthastighed i ventileret spalte på lodret facade ved brug af sporgas.

## - Kalibrering af målemetode

CHARLOTTE GUDUM

**DTU**



**2000**  
**SAGSRAPPORT**  
**SR-0020**

ISSN 1396-402X

INSTITUT FOR BYGNINGER OG ENERGI  
DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET



**IBE**

## 1.0 Formål

Formålet er at kalibrere en målemetode, der ved anvendelse af sporgas og konstant doserings metode, bestemmer gennemsnitlig lufthastighed i en ventileret spalte udfra sporgaskoncentrationen i spalten.

## 2.0 Baggrund

I forbindelse med ph.d.-projektet ”Fugttransport og konvektion i bygningskonstruktioner” undersøges hvordan vindforhold og temperaturgradient påvirker lufthastigheden i en ventileret spalte på en facade, og hvordan lufthastigheden har indflydelse på den konvektive fugttransport.

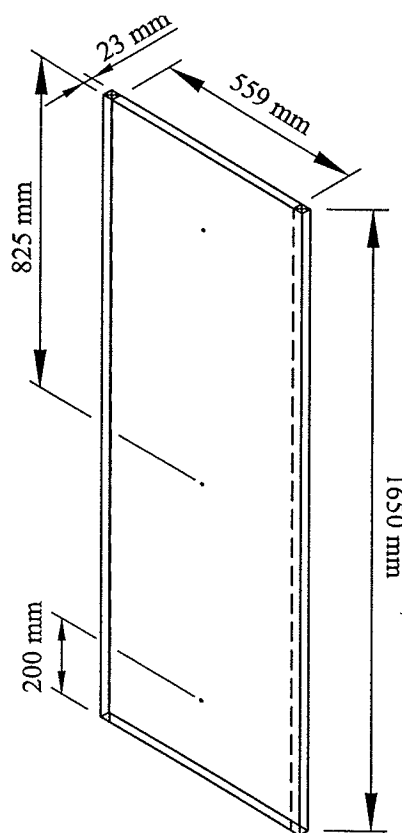
Sporgasmetoden er oprindelig udviklet til indeklimamålinger af luftskiftet, hvilket vil sige lave lufthastigheder og store voluminer, hvor der forudsættes fuldstændig opblanding af sporgassen for korrekte resultater. For at kompensere for manglende opblanding og måleslangernes reduktion af gennemstrømningsarealet, kalibreres målemetoden i laboratoriet på en fuld skala model af en ventileret spalte, hvor volumenstrømmen igennem spalten kan måles og varieres.

Det skal bemærkes at grundet variation i materialerne, er den indendørs model lavet med spaltebredde 23 mm, mens målene på den udvendige model er 25 mm. Bredden er for begge modeller 559 mm. Dette har betydning når kalibreringsresultatet anvendes til hastighedsbestemmelse i den udvendige model.

## 3.0 Beskrivelse af opstillingen

Indendørs er placeret en model af en ventileret spalte, se Figur 1. En bagbeklædning af mørkmalet træ og yderbeklædning af 4 mm plexiglasplade er adskilt med 23 mm afstandslister i hver side. Spaltens indvendige mål  $\text{højde} \times \text{bredde} \times \text{dybde} = 1,650 \times 0,559 \times 0,023 \text{ m}^3$ . Spalten er åben i den ene ende, mens der over den anden er placeret en tæt kasse, hvorpå der kan tilsluttes et varierende sug.

Volumenflowet igennem kassen måles med gasmåler for lufthastighed  $<0,1 \text{ m/s}$  eller blænde ved lufthastighed  $>0,4 \text{ m/s}$ . Det målte volumenflow omregnes til en gennemsnitshastighed for luften, ved at dele med spaltens tværsnitsareal vinkelret på strømningsretningen.



**Figur 1 Model af ventileret spalte**

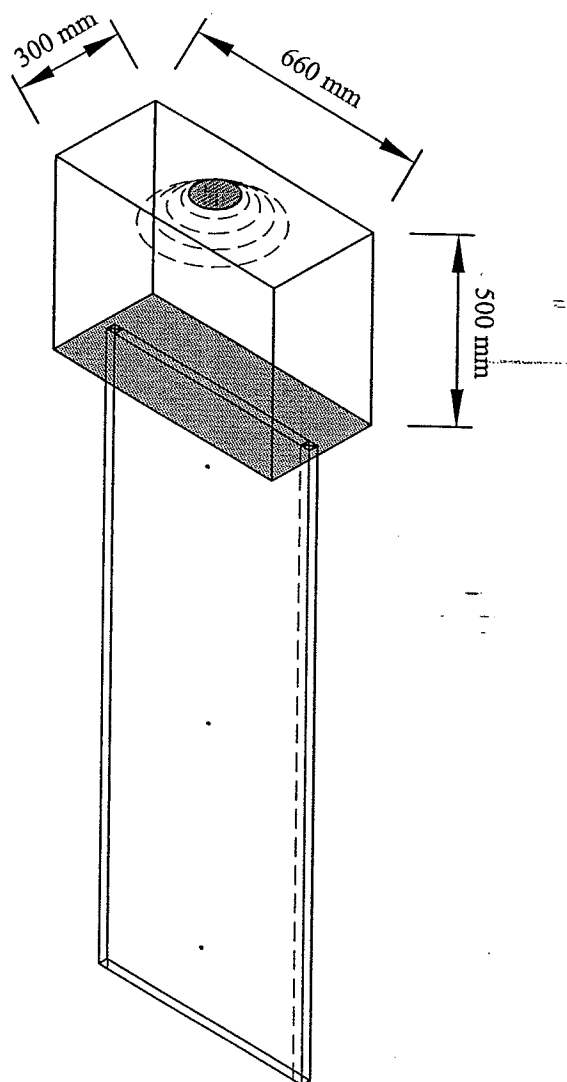
I yderbeklædningen af plexiglas er der lavet tre huller. Et i midten til dosering af sporgas og et 0,2 m fra hver spalteåbning til prøveudtag. Der doseres sporgas og udtages prøver igennem en perforeret slange i hele spaltens bredde, hvor hullerne er vinkelret på luftstrømmens retning. For at sikre en jævn dosering og prøveudtag er der lavet forsøg med forskellig hulstørrelse og placering, som er beskrevet i [Gudum, 2000].

Spændingen der tilføres støvsugeren eller ventilationspumpen, varieres med en transformator. Afkastluften fra støvsugeren ledes med et punktudsug ud i omgivelserne, for at undgå forurening af laboratoriet med den anvendte sporgas (lattergas).

### **3.1 Udformning af sug over spalten**

Luftstrømmen i spalten drives ved et konstant sug over spaltens udløb. Det vælges at benytte sug frem for indblæsning, fordi dybdevirkningen af lufthastigheden omkring en udsugningsåbning er lille, 30-40 gange mindre end ved indblæsning. [Sørensen, 1996]

For at sikre at suget er ensartet over hele spalteåbningen, bygges en tæt kasse omkring udløbet, hvori der dannes undertryk ved at suge fra kassens side modsat spalteåbningen. Se Figur 2.



Figur 2 Trykkasse med hastighedslinier omkring udsug.

### 3.2 Variation af lufthastighed

Luftstrømmen igennem spalten varieres, idet der suges med forskellig styrke. En slange tilsluttet trykkassen forbindes via en volumenmåler til et sugende aggregat. For lufthastighed  $< 0,1$  m/s suges luften med en støvsuger via en gasmåler. Gasmåleren har en tæller, der aflæses sammen med et stopur, således at det passerede volumen og et tilhørende tidsrum noteres. Volumenflowmålingerne foretages efter sugeren har kørt i ca. 15 minutter og tidsrummet for målingen er ca. 10 min.

For lufthastighed  $> 0,4$  m/s suges, ved at placere en ventilationspumpe på udløbssiden. Mellem kassen med undertryk og pumpen anbringes en blænde. Med et micromanometer måles et trykfald imellem to udtag på blænden, der med en kalibreringskurve for blænden omsættes til et volumenflow. Trykfaldet findes som gennemsnittet over 60 sek., målt med 1 Hz.

### 3.3 Variation af strømningsretning

Der laves målinger af samhørende værdier af volumenflow og sporgaskoncentration. Dette gøres for forskellige volumenflow, der fastholdes under den enkelte måling. Disse forsøg udføres for lave flow med trykkassen såvel øverst som nederst (støvsuger), og for høje flow med trykkassen nederst (ventilationspumpen). Herved kan effekten af en evt. termisk opdrift og densitetsforskellen mellem sporgas og atmosfærisk luft ses, samtidig med at metoden bliver afprøvet på strømninger i begge retninger, vertikalt, sådan som det forventes at finde sted ved de kommende udendørs forsøg.

Den termiske opdrift kunne ligeledes være elimineret ved at lave forsøgene vandret, men effekten af sporgassens densitet forskellig fra atmosfærisk lufts densitet ville da påvirke forsøget anderledes.

### 4.0 Teoretiske overvejelser og grundlag for forsøgsopstillingen

I det følgende forklares med taleksempler og overslagsberegninger hvad der ligger bag udformningen af forsøgsopstillingen.

#### 4.1 Eksempel på hastighed over spaltens udløb

Omkring et cirkulært udsug dannes kugleformede hastighedslinier, hvor hver line repræsenterer en konstant hastighed. På Figur 2 er de virkelige hastighedslinier skitseret, og det ses at disse er mere flade end de ideelle kugleformede hastighedslinier. Til overslagsberegning antages ideelle kugleformede hastighedslinier.

”Al luften, som suges gennem udsugningsåbningen, må passere kuglens overflade.” [Sørensen, 1996]. Hastigheden ved kugleoverfladen i afstanden  $r$  fra indløb, beregnes som:

$$v = \frac{q_v}{A}, \quad \text{hvor } A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$$

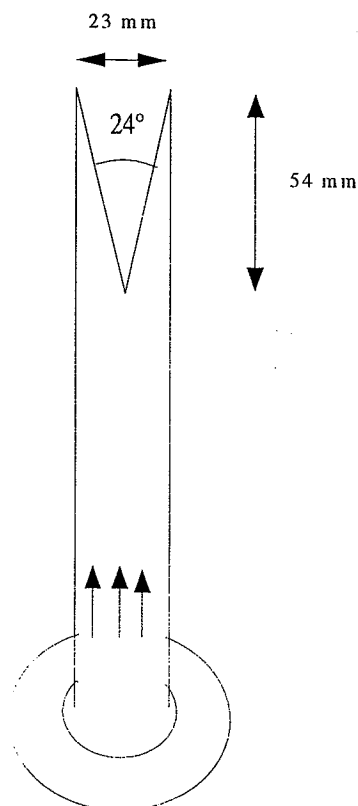
Spalten placeres centralt i kassens ene side, der har målene 660x300 mm<sup>2</sup>. I modsatte side af spalten, i en afstand af 500 mm, placeres et hul centralt med diameteren 18 mm for flow <0,1 m/s i spalten og diameter 100 mm for flow >0,4 m/s.

Ideelt set skulle udsuget, og dermed hastigheden, være konstant over hele spaltens åbningsareal. Da der suges i et punkt vil dette ikke være opfyldt. Derfor laves der i det følgende et overslag over hvor meget hastigheden teoretisk set varierer over spalten ved de værste tænkelige forhold.

Under forsøgene blev der målt med en maksimal hastighed i spalten på 1,5 m/s. Det beregnes at med et sug der giver en lufthastighed på 1,5 m/s i spalten er volumenstrømmen  $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$ . I en afstand på 500 mm fra udsugningsåbningen beregnes den kugleformede hastighedslinie teoretisk til 0,006 m/s. Suges der midt over spalten, med bredden 0,559 m, i en afstand på 500 mm, vil afstanden til fjerneste punkt være 570 mm. Indsættes dette i formelen for hastighed ved kugleoverfladen bliver denne 0,004 m/s for  $r = 570 \text{ mm}$ . Forskellen i hastigheden over hele spalten ses at være lille, maksimalt varierende mellem 0,005-0,006 m/s, således at der kan antages ensartet sug over hele spalteåbningen.

#### 4.2 Luftbevægelser i spalten

Strømningen i spalten vil optræde både turbulent og laminar afhængig af luftens hastighed. Derudover vil der være en forstyrrelse af strømningen ved ud- og indløb afhængig af åbningernes udformning.



Figur 3 Luftbevægelserne ved ind- og udløb af ventileret spalte

Det kan antages at strømningen er laminar for små værdier af det dimensionsløse Reynolds (Re) tal.

Beregninger af Reynolds tal viser at  $Re < 2100$  for middelhastigheden  $< 0,7$  m/s ved  $20^\circ\text{C}$  i den aktuelle spalte, hvilket er omslaget fra laminar til turbulent flow [Bird, Stewart & Lightfoot, 1960], Dvs. at for  $Re > 2100$  kan strømmingen ikke længere antages laminar.

Udløbet fra spalten, der er indløb til kassen, anskues som identisk med forhold omkring en indblæsningsåbning. Omkring en cirkulær åbning gælder at luftstrålens udbredelsesvinkel er ca.  $24^\circ$ . Se Figur 3. Denne udbredelsesvinkel antages tillige at gælde for rektangulære åbninger. Med en spaltebredde på 23 mm og vinkel på  $24^\circ$  vil forstyrrelsen ned i spalten være i en dybde på 54 mm.

Indløbslængden er afstanden fra indløbet hvor strømning udvikler sig og derfor ikke kan antages fuldt udviklet. Dette er for laminar strømning i spalten og en middellufthastighed på 0,7 m/s beregnet til 4,5 m. For middellufthastighed på 0,1 m/s findes indløbslængden at være 0,65 m. Det vil altså kun være for meget lave hastigheder at der opnås fuldt udviklet strømning i den 1,65 m høje spalte.

### 4.3 Sporgaskoncentrationens teoretiske afhængighed af hastigheden

Hastigheden er fundet ved at måle samhørende værdier af volumen der passerer igennem en gasmåler og tidsrum, og dele volumenflowet med tværsnitsarealet. Hvor dybden er 0,025 m og bredden er 0,559 m.

$$u = \frac{Q_v}{d \cdot b}$$

hvor  $u$  er den lodrette hastighed [m/s]  
 $Q_v$  er volumenflow [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $d$  er spaltens dybde [m]  
 $b$  er spaltens bredde [m]

Den målte koncentration af sporgas kan omregnes til en hastighed, idet der antages at det udtagne prøvevolumen er repræsentativt for koncentrationen i planet ved prøveudtaget vinkelret på strømningsretningen.

$$c_{\text{spalten}} - c_{\text{baggrund}} = \frac{F}{((d \cdot b \cdot u) + V_F - V_U)}$$

hvor  $c$  er koncentrationen i spalten hhv. i omgivelserne (baggrund) [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]  
 $F$  er doseret sporgas [ $\text{mg}/\text{s}$ ]  
 $u$  er den lodrette hastighed [m/s]  
 $d$  er spaltens dybde [m]  
 $b$  er spaltens bredde [m]  
 $V_F$  er tilført volumen sporgas [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $V_U$  er fjernet volumen luft til prøveudtag [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]



Volumenet til prøveudtag,  $V_U$ , er af samme størrelsesorden som det doserede volumen,  $V_F$ , så der udtages et volumen svarende til det der doseres. Det viste sig under målingerne at den konstante dosering var højere end forventet. Forskellen i doseret og udtaget prøvevolumen er lille i fh.t. den luftmængde der strømme igennem spalten. Volumenet der udtages til prøver er af samme størrelsesorden som mængden der doseres, hvorfor der ses der bort fra  $V_U$  og  $V_F$  i beregningerne.

Koncentrationen af sporgas i omgivelserne er lille i fh.t. sporgaskoncentrationen i spalten under de fleste målinger. Under nogle målinger var den til tider høj, hvorfor den medtages i beregning af lufthastigheden. Formel kan på baggrund af ovenstående reduceres til:

$$c_{spalte} - c_{baggrund} = \frac{F}{d \cdot b \cdot u}$$

## 5.0 Afprøvning af forskellige måleprincipper

Der blev lavet pilot forsøg med røg, trykdifferens og sporgas. Hvor udfaldet blev at sporgassen var den mest egnede til måling af lufthastigheden i spalten.

### 5.1 Forsøg med røg

Med en røgudvikler tilføres indblæsningsluften røgpartikler, der følger luftens bevægelser. I et meget snævert område for varierende hastighed er det muligt at måle tidsrummet hvor røgen passerer mellem to punkter. Ved lave hastigheder ses røgen at bevæge sig rundt i store hvirvler der gør det vanskeligt at bestemme den lodrette hastighed. Ved høje hastigheder er usikkerheden for tidsmålingen for stor, til at give brugbare resultater.

Røgen fotograferes og studeres for at afsløre stillestående luftlommer. Til de udendørs forsøg benyttes røgen til verificering af strømningsretningen for luftstrømmen, er i overensstemmelse med sporgassens retningsangivelse.

### 5.2 Måling af tryktab

Tryktabet over spalten måles ved brug af micro-manometer. En slange, der er tilsluttet micro-manometeret, er placeret i udløbsluften, midt i luftstrålen indeni trykkassen (beskrevet under "Udformning af sug over spalten"), med slangens snitflade parallel med strømningsretningen. Ved spaltens indløb placeres en tilsvarende slange, således at trykdifferensen bliver størst mulig. Dvs. at slangen er placeret udenfor en målelig påvirkning fra sugningsåbningens hastighedslinier i en højde svarende til luftspaltens indløb.

Målingerne viste stor standardafvigelse fra middelværdien, og metoden er ikke anvendelig i forhold til retningsbestemmelse af strømningsretningen. Dette sammen

med at der blev fundet god overensstemmelse mellem lufthastighed målt med sporgas hhv. gasmåler, gjorde at resultaterne fra trykmålingerne ikke blev videre behandlet.

### 5.3 Beskrivelse af konstant doseringsmetode

Til sporgasanalysen benyttes sporgasanalysator 1302 med multipointsampler 1303 fra Brüel & Kjær. Multipoint-sampleren styrer via pc dosering og udtag af prøver igennem et antal forskellige kanaler. Hver af de benyttede kanaler er tilsluttet slanger til enten prøveudtag eller sporgasdosering.

Til forsøget doseres der med konstant dosering af sporgas igennem hullet i midten af pladen. Der vælges den mindst mulige konstante dosering, som er ca. 0,5 ml/s. Igenennem de to huller hhv. over og under doseringshullet udtages prøver. Multipoint-sampleren udtager ved hver prøve et volumen på 140 ml.

Ved dosering tilføres spalten et volumen luft og ved prøveudtag fjernes omvendt et vist volumen. Styringen af dosering og prøveudtag indstilles så det volumen der udtages til prøver er af samme størrelsesorden som det volumen sporgas der tilføres.

Ved hver måling udtages to prøver á 140 ml, i alt 280 ml. Prøverne udtages over og under doseringsstedet, fordi strømningsretningen er ukendt ved de kommende udendørs målinger.

Med konstant dosering på 0,5 ml/s tager det 560 s at dosere samme mængde (280 ml). Øges doseringen opstår arbejdsmiljøproblemer med for høje koncentrationer af sporgassen (50 ppm) og ved lave hastigheder overskrides kalibreringens måleområde på 30.000 ppm (ca. 0,005 m/s for konstant dosering på 0,5 ml/s).

Der vælges at laves prøveudtag hvert 9. minut i hver af de to punkter hhv. over og under doseringen i midten. Dvs. at der i punkt 1 tages prøve til  $t=0$ , og i punkt 2 til  $t=3$  minutter. Dette gentages hvert 9. minut. Desuden tages prøve i omgivelserne til  $t=6$  minutter, hvilket ligeledes gentages hvert 9. minut.

Under målingerne viste det sig at doseringen ikke var så nøjagtig som forventet. Dette er ikke et væsentlig problem for resultaternes nøjagtighed, fordi den faktisk doserede gasmængde måles nøjagtig. Med de anvendte slangelængder var doseringen omkring 0,8 ml/s.

### 6.0 Procedure for målinger med sporgas

Hastigheden af luften startes eller ændres ved at tænde støvsuger og indstille spændingen med en vario. Opstillingen står med uændret sug 15 min. inden sprorgasmålingerne startes. Gasanalysatoren tændes som opvarmning. Inden 1. forsøg, laves kalibrering af doseringsdyse på multipointer med den anvendte gas. Disse kalibreringsdata gemmes, så kalibrering ikke gentages før kommende målinger, så længe gassen er uændret. Ved efterfølgende målinger indledes blot med at skylle doseringsdysen med sporgassen.

Under sporgasforsøget måles volumenflowet med gasmåler og stopur eller med micromanometer over blænde. Til forskellige hastighed tilføres røg til indsugningsluften i spalten, som fotograferes og stillestående luftlommer noteres. Varigheden af hvert forsøg er ca. 1 time, når den målte sporgaskoncentration i spalten vurderes at være stabil.

## 7.0 Resultater for måling af hastighed med røg

Hastigheden af røg blev målt mellem to vandrette tapestrimler på flexipladen med indbyrdes afstand på 785 mm. Røg blev tilført underspalten og tiden registreret med stopur. Dette blev gjort 6 steder på tværs af spalten, med resultater angivet i skemaet nedenfor, hvor gennemsnittet er 0,11 m/s. Samtidig måling med gasmåler viste en gennemsnitshastighed på 0,08 m/s.

	a	b	c	d	e	f
Vandret afstand i mm fra venstre kant	35	140	260	300	420	525
Hastighed m/s	0,10	0,12	0,10	0,10	0,12	0,11

Hastigheden målt 6 steder på tværs viste ca. samme hastighed ved sider og midt men i fjerdedelpunktet fra hver side var hastigheden højere. Således blev den gennemsnitlige hastighed målt til 0,11 m/s med røg, hvor flowmåler viste 0,08 m/s. Altså en faktor 1,4 mindre med flowmåler.

Med visualisering af luftbevægelserne med røg ses, hvordan slangerne hæmmer luftgennemstrømningen, og hvordan der kan forekomme stillestående luftlommer over T-stykket i midten, hvilket forklarer den lavere målte hastighed i punkt c og d. Røgfanerne kan ses i flere minutter efter stop for røgdosering.

Det vurderes at usikkerheden i forbindelse med røgmålinger er for stor, så røgen ved resten af forsøgene benyttes til at se om der opstår lommer med stillestående luft.

## 7.2 Resultater for måling af hastighed med sporgas

Resultaterne fra prøverne præsenteres i skemaet nedenfor og illustreres efterfølgende med to grafer. En graf der viser alle måleresultater og et udsnit af denne for hastighed mindre end 0,2 m/s.

Hastighed , ifølge volumen- flowmåler  [m/s]	Sporgas, sug øverst [m/s]	Sporgas, sug nederst [m/s]	Sporgaskonc. i spalte, $c_{\text{spalte}}$ [mg/m <sup>3</sup> ]	Sporgaskonc. baggrund, $c_{\text{baggrund}}$ [mg/m <sup>3</sup> ]	$\frac{c_{\text{spalte}} - c_{\text{baggrund}}}{\text{gasdosering / tid}}$ [s/m <sup>3</sup> ]
0,017	0,016		7584	61	4881
0,031	0,026		5243	12	3007
0,031	0,030		4521	11	2570
0,054	0,038		3002	7	2051
0,063	0,040		3318	9	1969
0,084	0,050		2344	8	1567
0,040		0,039	3542	53	2014
0,050		0,041	3361	61	1875
0,055		0,046	2705	16	1678
0,066		0,048	2464	26	1632
0,078		0,057	2273	14	1377
0,194		0,203	685	27	383
0,404		0,331	424	20	235
0,762		0,568	288	10	137
1,381		1,037	166	37	75

Ved iagttagelse af røg ses for hastigheder  $<0,5$  m/s at røgen opholder sig længe i spalten og drejer rundt i store cirkler. For lufthastighed  $>0,5$  trækkes røgen igennem spalten i lige spor. Her er hastigheden så høj at røgen kan ses, men ikke studeres i detaljer.

Det umiddelbare indtryk er turbulente strømninger ved lave hastigheder og laminar strømning ved høje hastigheder, hvilket er i modstrid med teorien for strømning. Forklaringen er at sonderingen mellem turbulens og laminar strøm, er ganske små hvirvler der dårligt kan ses med det blotte øje.

At røgen ikke syntes laminar for lave hastigheder skyldes at der er en starthastighed for røgen og en betydelig indløbslængde for luften før end strømmingen bliver stabil.

Det formodes at såvel dosering som prøveudtag, samt røgens starthastighed har indflydelse på bevægelsen. Selv om denne påvirkning er forsøgt minimeret ved at slangehullerne er vandret og dermed gasstrøm vinkelret på luftstrømmingen.

## 8.0 Bestemmelse af analytisk udtryk for lufthastigheden som funktion af sporgaskoncentration

Med program til kurvefitning fittes på baggrund af sporgasmålinger og målinger med gasmåler/blænde en kurve af formen

$$u = \frac{a}{\frac{c_{spalte} - c_{baggrund}}{F}}$$

hvor  $u$  er gennemsnitshastigheden imellem spalteåbningerne m/s  
 $a$  er den fittede konstant  $a=102,38339$   
 $c_{spalte}$  er koncentrationen af sporgas målt i spalten [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]  
 $c_{baggrund}$  er baggrundskoncentrationen af sporgas [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]  
 $F$  er doseret sporgas per tid [ $\text{mg}/\text{s}$ ]

Der findes en regressionsmodel, der har standardafvigelsen  $S=0,023$  og korrelationskoefficienten  $r=0,998$ . Det analytiske udtryk for hastigheden i spalten som funktion af målt sporgaskoncentration bliver:

$$u = \frac{102,38339}{\frac{c_{spalte} - c_{baggrund}}{F}}$$

Konstanten  $a$ , svarer til den reciproke værdi af et ækvivalent tværsnitsareal. Den reciproke værdi af  $a$  er  $0,009767 \text{ m}^2$ . Hvor det faktiske tværsnitsareal er  $0,012857 \text{ m}^2$ . Forskellen mellem det faktiske og det reducerede areal, svarer til den reduktion der sker som følge af måleslangernes placering i spalten.

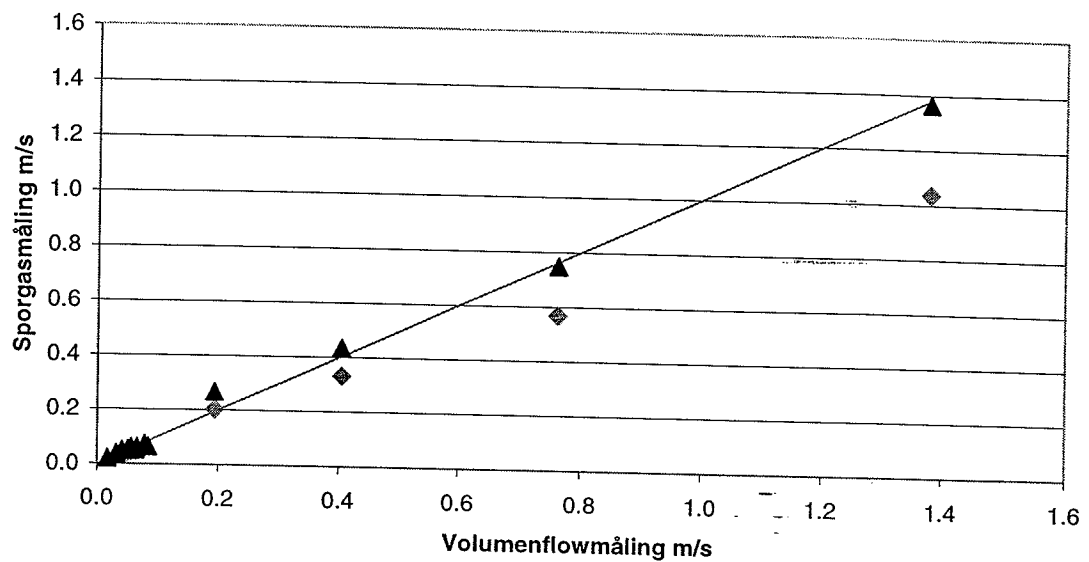
Reduktionen som følge af måleslanger antages at være den samme for modellerne hhv. ude og inde. For den udendørs model er spalten som nævnt i starten 25 mm i bredden, hvor den indendørs model er 23 mm. Det faktiske tværsnitsareal er  $0,013975 \text{ m}^2$  for den udendørs model, med den konstante reduktion på  $0,00309 \text{ m}^2$  fås et reduceret tværsnitsareal på  $0,010882 \text{ m}^2$ , og en konstant  $a=91,8695$ .

Samlet fås for spaltebredde hhv. 23mm og 25 mm:

$$a_{23 \text{ mm}} = 102,38339$$

$$a_{25 \text{ mm}} = 91,8695$$

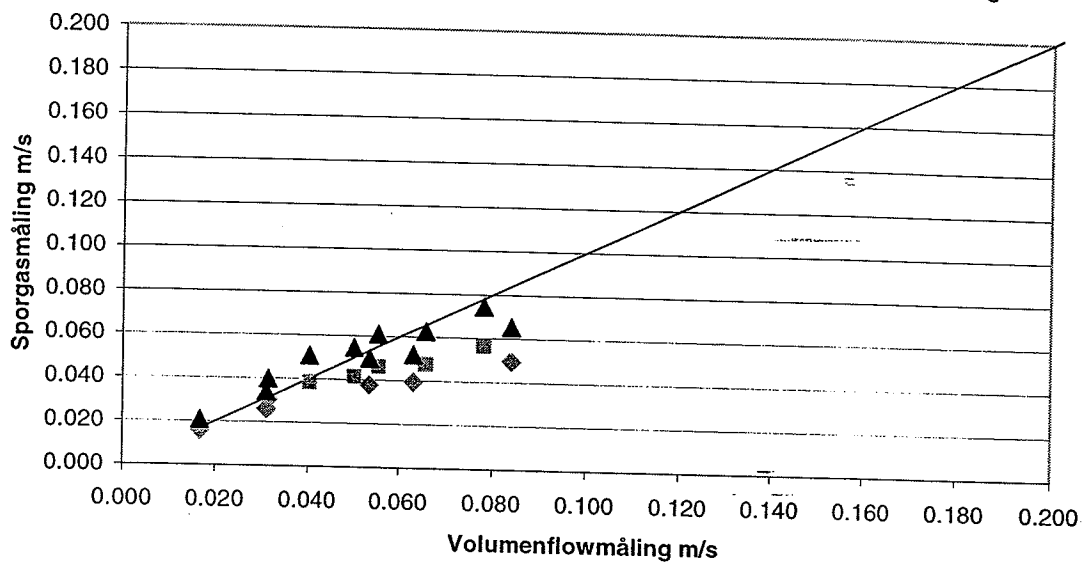
Måling af lufthastighed med sporgas og med volumenflowmåler på model af ventileret spalte i forsøgshal



**Figur 4** ♦ målt sporgaskoncentration omregnet til hastighed med analytisk udtryk  
▲ målt sporgaskoncentration omregnet til hastighed med fittet udtryk

'Hastigheden målt med sporgas' som funktion af 'hastigheden målt med volumenflowmåler' er afbildet på Figur 4. punkterne viser hastighed når hhv. analytisk udtryk og det fittede udtryk benyttes med den målte sporgaskoncentration. Af Figur 4 ses at sporgasmålingernes absolutte afvigelse (analytisk udtryk) fra volumenflowmålingerne er stigende med stigende lufthastighed. Med det fittede udtryk fås en god overensstemmelse mellem resultaterne fra sporgasmålingerne og volumenflowmålingerne.

Måling af lufthastighed med sporgas og med volumenflowmåler på model af ventileret spalte i forsøgshal



**Figur 5**

- ◆ målt sporgaskoncentration med sug øverst omregnet til hastighed med analytisk udtryk
- målt sporgaskoncentration med sug nederst omregnet til hastighed med analytisk udtryk
- ▲ målt sporgaskoncentration omregnet til hastighed med fittet udtryk

Figur 5 viser nederste del af Figur 4. Her ses målinger af lufthastighed med sporgasmetode som funktion af hastigheden målt med volumenflowmetode. Der er foretaget målinger med suget placeret enten for oven eller for neden (opstillingen vendt 180°).

Resultaterne viser en stigende absolut afvigelse mellem målemetoderne med stigende flow, hvor der opnås tilfredsstillende overensstemmelse mellem volumenflowmålingerne og sporgasmålingerne når udtrykket med den fittede konstant anvendes for strømning i begge retninger.

Det ses at målinger med suget placeret øverst ligger under målingerne hvor suget var placeret nederst, således at afvigelsen fra flowmålingen er større når suget er øverst end når suget er placeret nederst. Dette skyldes at lattergas, som er anvendt som sporgas, har en densitet på 1,53 gange luftens densitet. Derved virker tyngdekraften og sugekraften samme vej, når suget placeres nederst. Dette betyder lavere målt koncentration, som omregnet giver højere hastighed. Heraf ses tillige at den termiske opdrift har været neglignel i fh.t. densitetsforskellen, under de udførte forsøg.

## 9.0 Måleusikkerhed

Måleusikkerheden for de forskellige målemetoder vurderes ved at gennemgå hver måleprocedure og vurdere de systematiske og tilfældige fejl på de usammensatte (direkte) målinger af volumenflowet og benytte resultaterne til vurdering af usikkerheden på den sammensatte måling af lufthastigheden, som beskrevet i [Hansen, 1992]. Da usikkerheden er relativ til volumenflowet, laves usikkerhedsberegningen for både højt og lavt flow.

**Metode 1.** Måling af volumenflow med gasmåler ( $0,9 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 5 \text{ m}^3/\text{h}$ , svarer til  $0,02 \text{ m/s} < \text{lufthastighed} < 0,1 \text{ m/s}$ ), foretages ved at aflæse en gasmåler og et stopur ved start og efter ca. 5-10 min. Et stopur benyttes til at måle tiden (5-10 min) det tager et passende volumen (heltal  $\text{m}^3$ ) at passere gasmåleren. Usikkerheden på tidsmålingen vurderes til  $\pm 1 \text{ s}$ . Gasmålerens usikkerhed er angivet til  $\pm 0,5 \%$  af volumenflowet  $Q$ .

Målingen er behæftet med instrumentfejl på gasmåler og tilfældig fejl ved brug af stopur. Den resulterende usikkerhed,  $U_R$ , findes med kvadratformlen, for  $Q = 5 \text{ m}^3/\text{h}$ :

$$U_R = \sqrt{U_T^2 + U_S^2}$$

hvor

$$U_S = 0,5\% \cdot \frac{5 \text{ m}^3/\text{h}}{3600 \text{ s/h}} = 6,94 \cdot 10^{-6}$$

$$U_T = \frac{5 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 2 \text{ s}}{3600 \text{ s/h}} = 2,78 \cdot 10^{-3}$$

Samlet fås  $U_R = 0,003 \text{ m}^3/\text{s}$

Tilsvarende beregning for  $Q = 0,9 \text{ m}^3/\text{h}$  giver resulterende fejl på  $U_R = 0,0005 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Metode 2.** Måling af volumenflow ved brug af mikromanometer, der måler tryktab over blænde ( $5 \text{ m}^3/\text{h} < Q < 65 \text{ m}^3/\text{h}$ ). For  $0,4 \text{ m/s} < \text{lufthastighed} < 1,4 \text{ m/s}$ , er volumenflowet målt med trykfald over blænde med diameter 50 mm. Hvorefter volumenflowet der modsvarer trykfaldet aflæses af kalibreret kurve for blænden. Målingen er foretaget som gennemsnitlig trykfald over 1 min, hvor standardafvigelse blev fundet til 0,3 Pa. Usikkerheden for det anvendte mikromanometer er angivet til 0,25% af aflæsningen.

Ved de største flow ( $65 \text{ m}^3/\text{h}$ ) blev trykfaldet målt til ca. 130 Pa. Kalibreringskurven er optegnet på dobbelt logaritmisk papir. Det vurderes at aflæsningsnøjagtigheden er  $\pm 5 \text{ Pa}$ . Den systematiske fejl i form af instrumentfejl på mikromanometeret, udgør 0,25% af  $130 \text{ Pa} = 0,3 \text{ Pa}$ , hvilket stemmer overens med den standardafvigelse, der er observeret for målingerne. Den resulterende fejl på mikromanometeret findes med kvadratformlen:  $U_{R, \text{micromanometer}} = 5,0 \text{ Pa}$ . På grafen aflæses differencen i volumenflowet for  $130 \text{ Pa} \pm 5 \text{ Pa}$  til  $Q = 17,5 \pm 0,5 \text{ l/s}$ . Den samlede fejl på volumenflowmålingen med metode 2, sættes lig usikkerheden på aflæsningen, så  $U_R = 0,0005 \text{ m}^3/\text{s}$  for højt flow.



Ved lavt flow ( $18 \text{ m}^3/\text{h}$ ) blev trykfaldet målt i området  $5,5 \text{ Pa}$  med en standardafvigelse på  $0,05 \text{ Pa}$ . Aflæsningsnøjagtigheden på kalibreringskurven vurderes i dette område til  $\pm 0,2 \text{ Pa}$ . Den systematiske fejl på  $0,25\%$  af  $5,5 \text{ Pa} = 0,01 \text{ Pa}$ . Dette er lavere end den målte standardafvigelse. Usikkerheden på kalibreringskurven, er dog stadig den dominerende fejkilde. Lægges den målte standardafvigelse sammen med aflæsningsfejlen vha. kvadratformlen fås usikkerhed på  $\pm 0,2 \text{ Pa}$ . På grafen aflæses differencen i volumenflowet for  $5,5 \text{ Pa} \pm 0,2 \text{ Pa}$  til  $Q = 3,4 \pm 0,1 \text{ l/s}$ . Den samlede fejl på volumenflowmålingen med metode 2, sættes lig usikkerheden på aflæsningen, så  $U_R = 0,0001 \text{ m}^3/\text{s}$  for lavt flow.

**Metode 3.** Måling af volumenflow, ved anvendelse af konstant dosering af sporgas med Multipoint doser and -sampler og sporgasanalysator, der benytter sig af foto akustiks infrarødt måleprincip.

Sporgasanalysatoren måler med en nøjagtighed på  $1\%$  af den målte værdi og multipoint-sampleren doserer med  $2\%$  nøjagtighed ifølge specifikationerne for instrumenterne.

Som tidligere omtalt, blev der ved prøveudtag taget  $140 \text{ ml}$  ud per prøve. I løbet af en målecyklus på  $4 \text{ min}$  doseres omkring  $120 \text{ ml}$  og udtages  $280 \text{ ml}$  til prøver. Ved en lav hastighed på  $0,02 \text{ m/s}$  udgør forskellen på  $160 \text{ ml}$  omkring  $0,3\%$  af den passerede luftmængde. Ved høje hastigheder reduceres fejlen, som følge af stigende gennemstrømning af luft. Denne fejl vurderes at være ubetydelig i fh.t. målefejlen på instrumenterne.

Doseringen,  $F$ , var under forsøgene omkring  $1,7 \text{ mg/s}$ , med usikkerhed på  $2\%$ . Volumenflowmålingen er en sammensat måling, hvor resultatet fremkommer efter udregning med formeludtrykket:

$$Q = \frac{F}{c_{\text{spalte}} - c_{\text{baggrund}}}$$

hvor "c" er den målte sporgaskoncentration i hhv. spalten og baggrunden.

Usikkerheden på den sammensatte måling findes som kvadratsummen af formeludtrykket, differentieret mht. hvert led gange målenøjagtigheden af de enkelte parametre (Hansen et al. 1992).

$$U = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial F} \cdot U_F\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial c_s} \cdot U_{c_s}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial c_b} \cdot U_{c_b}\right)^2}$$

Den samlede usikkerhed udregnes med indsættelse af måleresultaterne for lave flow ca.  $0,9 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $0,0003 \text{ m}^3/\text{s}$ ), hvor  $F = 1,7 \text{ mg/s}$  og usikkerhed  $2\%$ ,  $c_s = 7584$  og  $c_b = 61$  begge med  $1\%$  usikkerhed. Heraf fås:

$$U_F = 0,034 \text{ mg/s}$$

$$U_{cs}=75,84 \text{ mg/m}^3$$

$$U_{cb}=0,61 \text{ mg/m}^3$$

$$\frac{\partial Q}{\partial F} = \frac{1}{c_s - c_b} = \frac{1}{7584 - 61} = 1,33 \cdot 10^{-4}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial c_s} = -\frac{F}{(c_s - c_b)^2} = -3,0 \cdot 10^{-8}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial c_b} = \frac{F}{(c_s - c_b)^2} = 3,0 \cdot 10^{-8}$$

Indsættes dette i formelen for den absolutte usikkerhed fås  $U = 0,000005 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Tilsvarende overvejelser og usikkerhedsberegning laves for flow ca. 5, 18 og  $65 \text{ m}^3/\text{h}$ .

$$Q=5 \text{ m}^3/\text{h} (0,001 \text{ m}^3/\text{s}):$$

$$F=1,7 \text{ mg/s}$$

$$c_s=2273 \text{ mg/m}^3$$

$$c_b=14 \text{ mg/m}^3$$

$$U_R=0,000017 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q=18 \text{ m}^3/\text{h} (0,005 \text{ m}^3/\text{s}):$$

$$F=1,7 \text{ mg/s}$$

$$c_s=685 \text{ mg/m}^3$$

$$c_b=27 \text{ mg/m}^3$$

$$U_R=0,000058 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q=65 \text{ m}^3/\text{h} (0,018 \text{ m}^3/\text{s}):$$

$$F=1,7 \text{ mg/s}$$

$$c_s=166 \text{ mg/m}^3$$

$$c_b=37 \text{ mg/m}^3$$

$$U_R=0,0003 \text{ m}^3/\text{s}$$

Til opsummering af ovenstående samles i skemaet nedenfor de fundne usikkerheder på volumenflowmålingerne, for hver af de tre benyttede metoder.

	Beskrivelse	Q [m <sup>3</sup> /h]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Usikkerhed på måling af volumenflow [m <sup>3</sup> /s]
Metode 1	Gasmåler Stopur	0,9	0,0003	0,0005
		5	0,0014	0,003
Metode 2	Mikromanometer Blænde	18	0,005	0,0001
		65	0,018	0,0015
Metode 3	Gasanalysator Multipoint doser and sampler	0,9	0,0003	5·10 <sup>-6</sup>
		5	0,0014	1,7·10 <sup>-5</sup>
		18	0,005	5,8·10 <sup>-5</sup>
		65	0,018	3,0·10 <sup>-4</sup>

Hastigheden,  $u$ , ud fra målingerne, findes ved at dele volumenflowet,  $Q$ , med spaltens tværsnitsareal,  $A$ . Hulrumsbredden og dybden varierer ifølge målinger med skydelære 1,5 mm. Den systematiske fejl på skydelæreren er 0,01 mm. Den resulterende fejl på hulrummets dybde og bredde vurderes heraf til 1,5 mm på hver led. Usikkerheden for den sammensatte måling af hastigheden, bestemmes analog til usikkerheden på volumenstrømmålingen med sporgas.

$$u = \frac{Q}{A}$$

Til usikkerhedsbestemmelse findes  $u$  differentieret mht. hvert led.

$$\frac{\partial u}{\partial Q} = \frac{1}{A} = \frac{1}{0,023 \cdot 0,559} = 77,78$$

$$\frac{\partial u}{\partial Q} = -\frac{Q}{A^2} = -\frac{Q}{(0,023 \cdot 0,559)^2} = -\frac{Q}{(0,023 \cdot 0,559)^2} = -Q \cdot 6049,52$$

$$U = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial Q} \cdot U_Q\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial A} \cdot U_A\right)^2}$$

Usikkerheden for hver metode og relevant volumenflow beregnes med denne formel. Eksempelvis gælder for metode 1 med volumenflow  $Q=0,0003 \text{ m}^3/\text{s}$  er  $U_Q=0,0005 \text{ m}^3/\text{s}$  og  $U_A=0,0015 \text{ m}^2$ :

$$U = \sqrt{(77,78 \cdot 0,0005)^2 + (-0,0003 \cdot 6049,52 \cdot 0,0015)^2} = 0,039 \approx 0,04 \text{ m/s}$$

Tilsvarende beregninger laves for de øvrige metoder og volumenflow, hvor de beregnede usikkerheder på hastighedsmålingerne er angivet i skemaet nedenfor.

	Beskrivelse	Q [m <sup>3</sup> /h]	Q [m <sup>3</sup> /s]	Usikkerhed på måling af hastighed [m/s]
Metode 1	Gasmåler Stopur	0,9	0,0003	0,04
		5	0,0014	0,23
Metode 2	Mikromanometer Blænde	18	0,005	0,05
		65	0,018	0,20
Metode 3	Gasanalysator Multipoint doser and sampler	0,9	0,0003	0,003
		5	0,0014	0,01
		18	0,005	0,05
		65	0,018	0,17

For både høje og lave flow findes usikkerheden med sporgasmålingen som værende lavere eller lig med hhv. gasmåler og trykfald over blænde.

Som tidligere omtalt, blev der ved prøveudtag taget 140 ml ud per prøve, hvilket kan udgøre en fejlkilde, specielt ved lave hastigheder. Et overslag viser at for en måleperiode på 4 min, doseres omkring 120 ml og udtages 280 ml til prøver. Ved en lav hastighed på 0,02 m/s udgør forskellen på 160 ml omkring 0,3% af den passerede luftmængde. Der ses derfor bort fra denne fejlkilde.

## 10.0 Diskussion af måleresultater

Det findes at den fittede konstant svarer til det faktiske tværsnitsareal reduceret med arealet af sporgasslangen. Afvigelserne af sporgasmålingerne fra volumenflowmålingerne ses at stemme overens med den reduktion af gennemstrømningsarealet der kommer fra doserings- og prøveudtagsslangene, som er placeret i spalten.

Forskellen mellem målingerne hvor luftstrømmen er hhv. lodret op og lodret ned kan forklares med forskel i densitet mellem sporgas og luft. Sporgassen er tungere end atmosfærisk luft, hvorfor partiklerne er langsommere end luftpartiklerne, når strømmen er opadrettet, og gaspartiklerne er hurtigst, når luftstrømmen er nedadrettet. Ved den opadrettede luftstrøm stiger den målte koncentration, når partiklerne bevæger sig langsommere end den omgivende luft hvilket omregnet giver en lavere hastighed. Omvendt falder den målte koncentration af sporgas ved nedadrettet luftstrøm, som så resulterer i højere målt hastighed.

I de gennemførte forsøg har den termiske opdrift været ubetydelig, da forskellen mellem sug hhv. for oven og for neden må tillægges densitetsforskelle mellem gas og atmosfærisk luft. Dette har ikke betydning for selve målemetoden, da en termisk opdrift

er en faktisk forekommende luftbevægelse, og ikke kunstig frembragt som følge af målemetoden, hvilket er tilfældet for effekten af densitetsforskel.

En ulempe ved sporgasmetoden, er den lange tid for prøveudtag (ca. 30 sek). Målingen bliver der for en middelhastighed for tidsrummet hvor prøveudtaget foretages.

Der ses en lille forskel i målt sporgaskoncentration alt efter retningen af luftstrømmen. En mulighed var at finde forskellige konstanter for de to retninger, men det vurderes at effekten er lille og der opnås tilfredsstillende nøjagtighed ved at fitte uden hensyntagen til strømningsretning. Det skal tilføjes at der ikke foreligger målinger med strømning nedefra for høje volumenflow. Her vil sugekraften være stor og tyngdekraften udgøre en mindre del, så effekten som følge af densitetsforskel er mindre.

Den fittede konstant stemmer overens med den reduktion af tværsnitsarealet der kan forventes som følge af sporgasslangens tværsnitsareal, hvorfor metoden kan benyttes for vilkårlig spalte, dog må lidt større usikkerhed antages, når der ikke er foretaget særskilt kalibrering på den pågældende spalte.

## 11.0 Konklusion

Der er fundet et analytisk udtryk med en empirisk konstant, gældende for den specifikke spalte med bredden 0,559m, dybden 0,023 m og højden 1,65 m. Udtrykket giver sammenhængen mellem gennemsnitlig lufthastighed i den ventilerede spalte som funktion af målt sporgaskoncentration uafhængig af strømningsretning, samtidig med at der er mulighed for retningsbestemmelse af strømmingen. Metoden vurderes at kunne anvendes for vilkårlig spalte. For den undersøgte spalte blev der for sporgasmetoden fundet en usikkerhed for hastigheden på 0,003-0,17 m/s for lufthastighed i intervallet 0,02-1,4 m/s.

Røg kan ikke anvendes for hverken høje eller lave hastigheder til bestemmelse af lufthastigheden, men giver nyttig information om stillestående luftlommer og om strømningsretningen, hvilket er vigtigt ved kommende udendørs forsøg, hvor strømningsretningen forventes at kunne forekomme i begge retninger.

Forsøg med tryktabsmåling i spalten til bestemmelse af luftens hastighed, viste stor spredning og er derfor ikke fundet egnet til formålet om lufthastighedsmåling i ventileret spalte.

## 12.0 Kilder

Bird, Stewart and Lightfoot: Transport Phenomena. Dept. of Chemical Engineering, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin. John Wiley & Sons Inc. 1960.

Gudum, Charlotte: Jævn dosering af sporgas i vandret plan på ventileret lodret spalte. Sagsrapport SR-0019. Institut for Bygninger og Energi, DTU. ISSN 1396-402x. 2000.

Hansen, H.E.; Kjærulf-Jensen, P. and Stampe, Ole B. 1992. Varme- og Klimateknik, Grundbog 1.udg, 2 oplag. Danvak. Teknisk Forlag A/S. København: Denmark.

Sørensen, Henning Hørup: VENTILATION STÅBI. 2. udgave 1996. Teknisk Forlag.

# Appendix D

Statistical analysis of correlations  
between wind velocities and cavity air velocities

Date for measurements: 22/8 – 24/8 2001

Table 1 Statistical analysis of all measured air velocities with the nearest wind velocity

	Coefficients	Standarddev	P-værdi
Intercept	0.027271	0.22343	0.902941
Slope	0.296791	0.258427	0.251748

Statistical analysis on the hourly mean air velocity with the hourly mean wind velocity shows that both the slope and the intercept significant, as the P-values are below the critical value of 0.05.

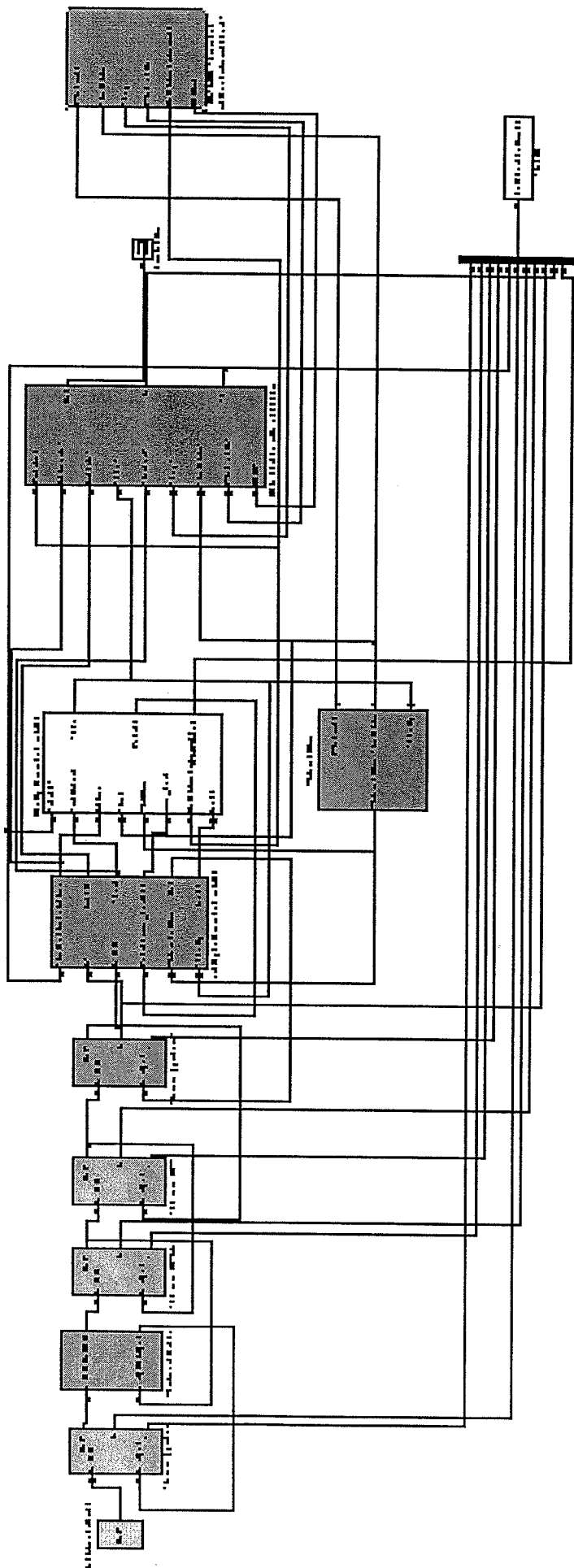
Table 2 Statistical analysis of hourly mean values of air velocity and wind velocity.

Date	Intercept	Stddev	P-value	Slope	Stddev	P-value	Wind dir
9/2-12/2	-0.1779	0.6617	0.7889	0.0829	0.1401	0.5565	214
20/2-21/2	0.2649	0.337	0.443	0.01427	0.0390	0.7191	273
21/2-22/2	-0.9951	1.1216	0.3846	0.1917	0.1349	0.1693	293
22/2-23/2	-1.4726	2.0965	0.5002	0.4900	0.5546	0.3999	2
10/2 8:30- 11/2 4:30	0.088	0.100	0.392	-0.051	0.030	0.110	-



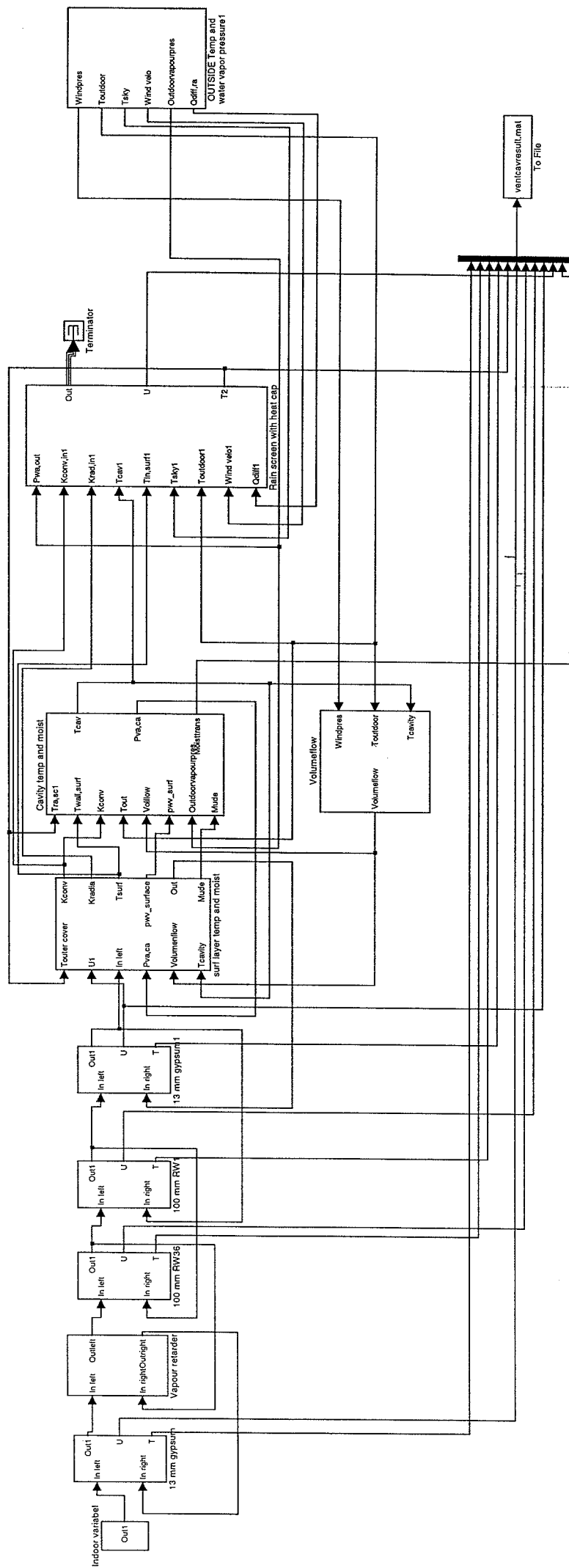
# Appendix E

Graphical representation of Simulink models

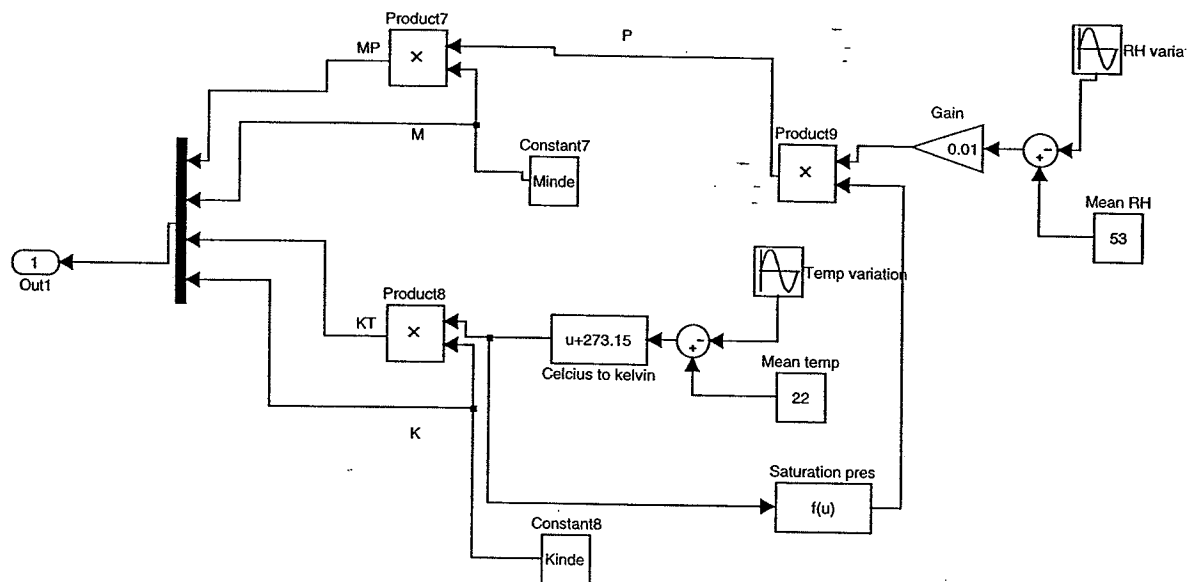


# Appendix E

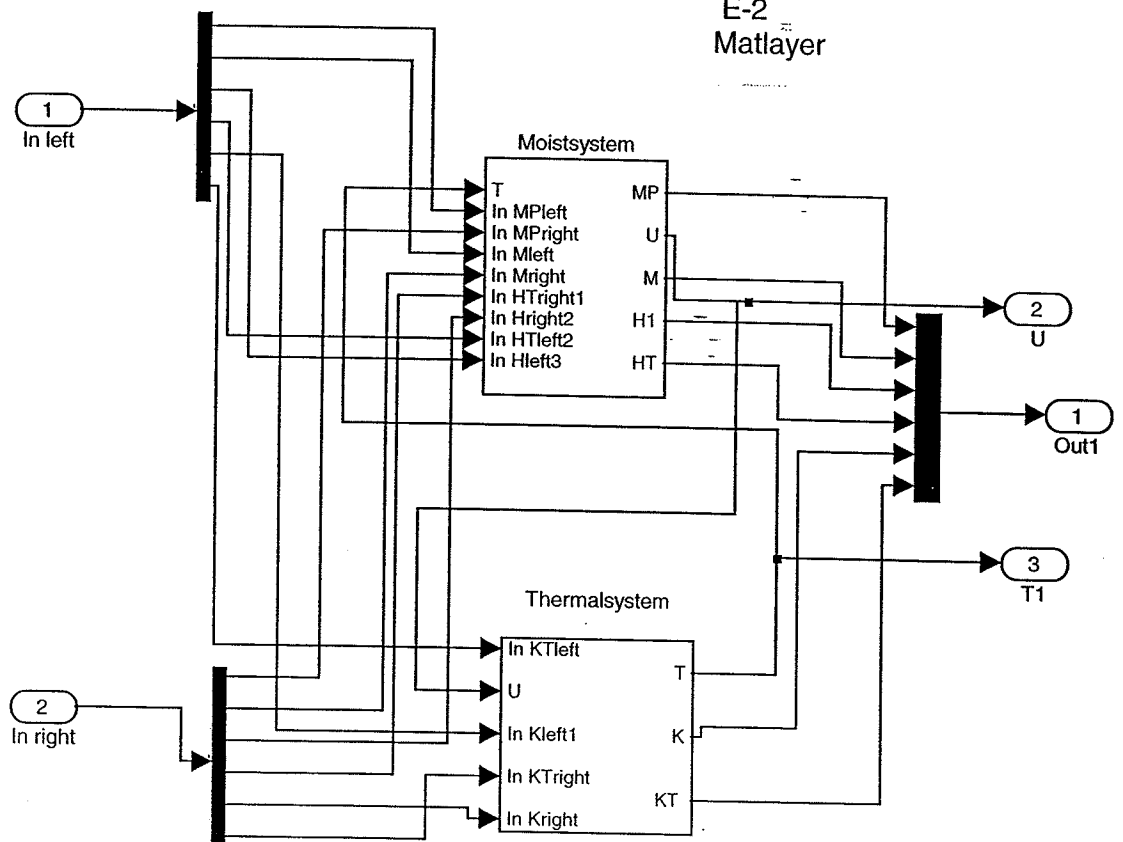
- E-1 Indoor variable
- E-2 Matlayer
- E-3 Node
- E-4 Vapour retarder
- E-5 Surf layer temp and moist
- E-6 Cavity temp and moist
- E-7 Volumeflow
- E-8 Rain screen with heat cap
- E-9 Outside temp and water vapour pressure
- E-10 Config weather data
- E-11 Dist. Weatherdata



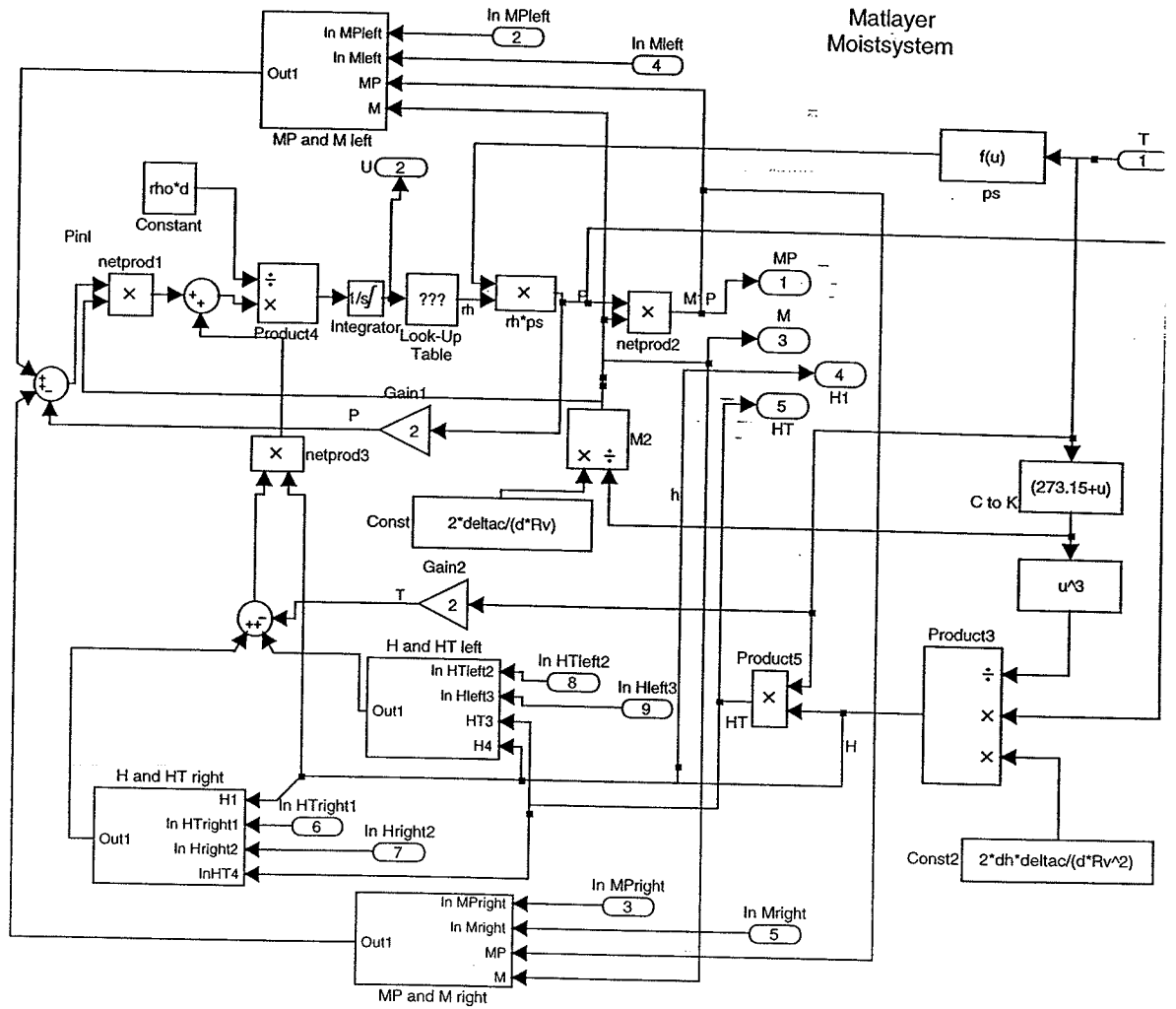
# E-1 Indoor variable



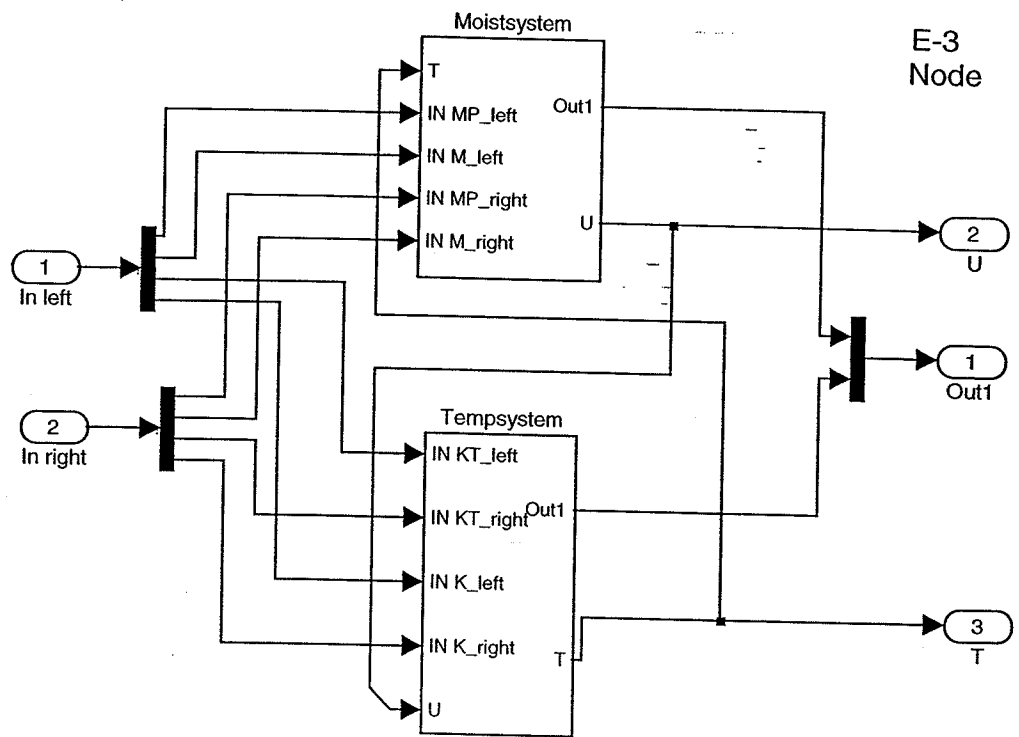
E-2  
Matlayer



# Matlayer Moistsystem

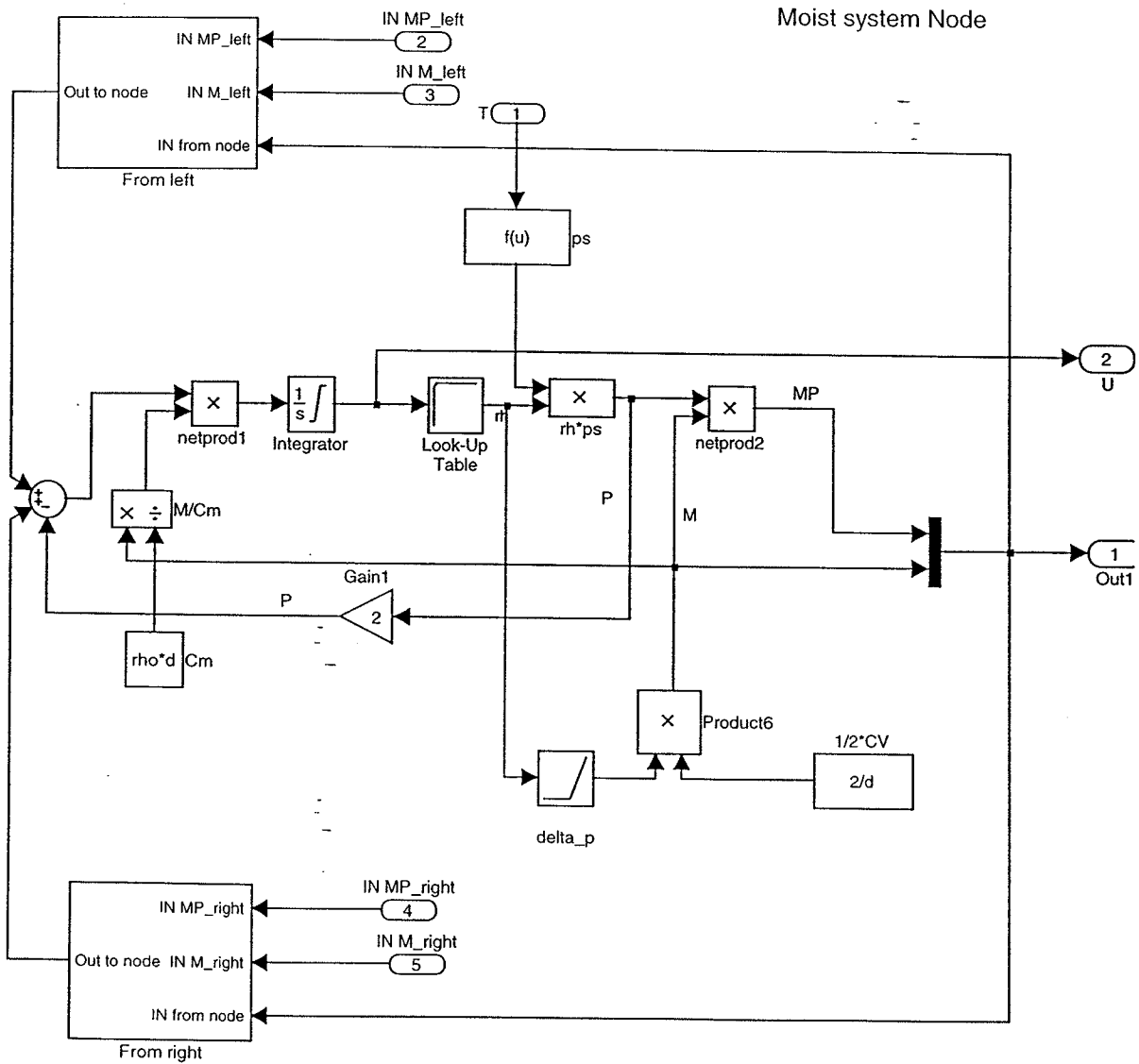




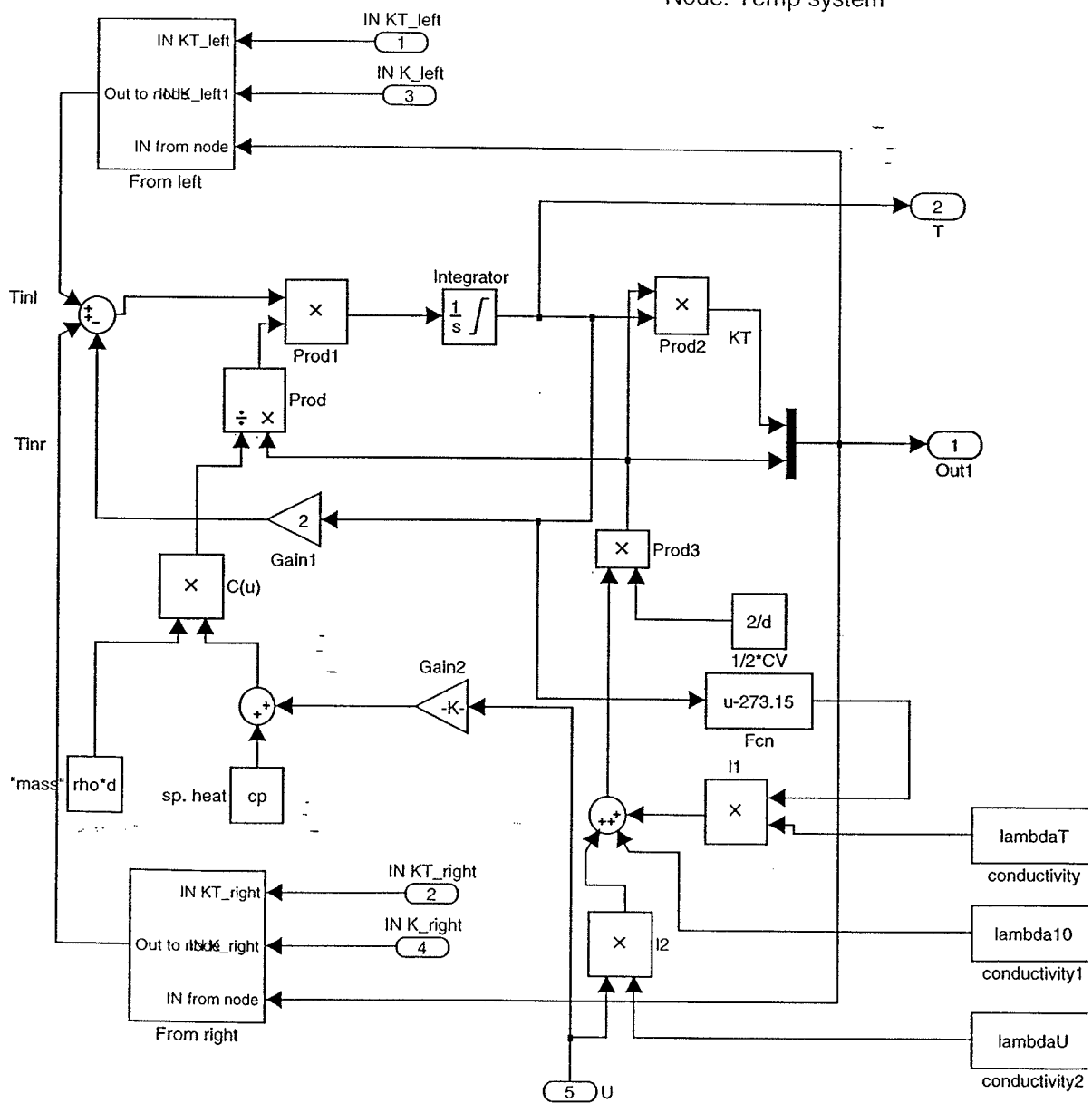


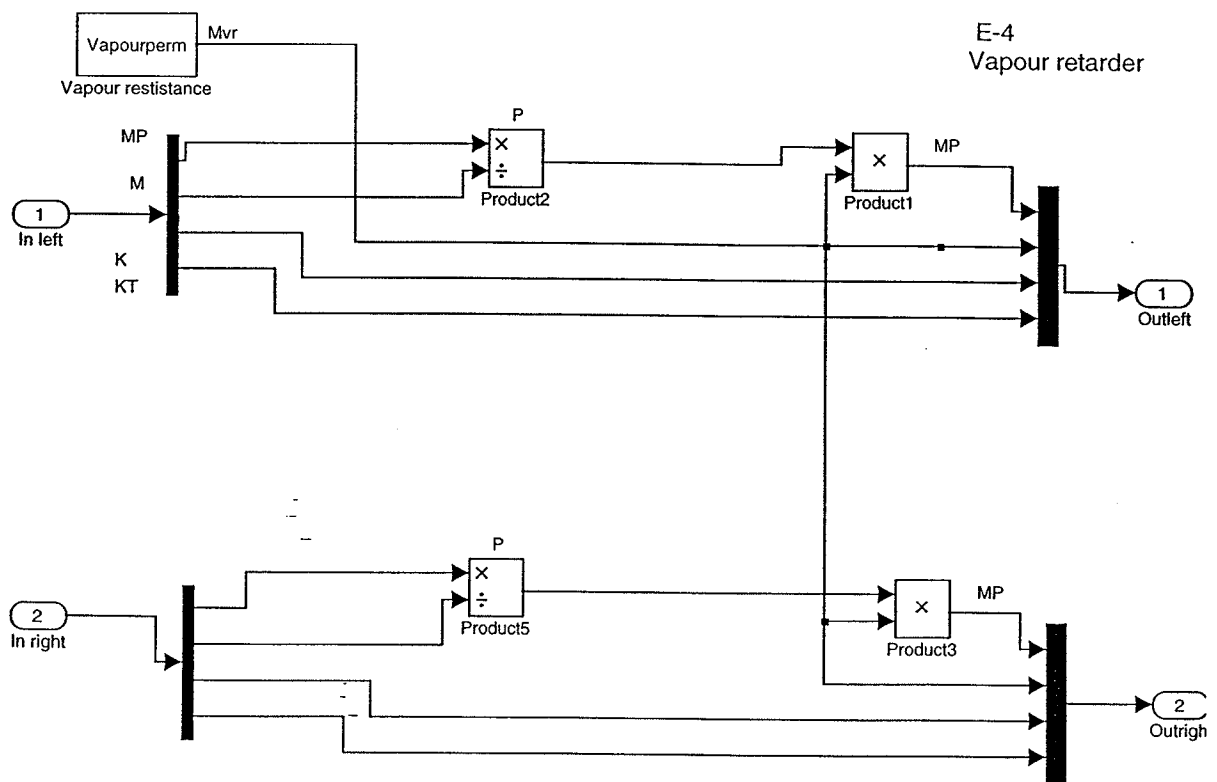


# Moist system Node

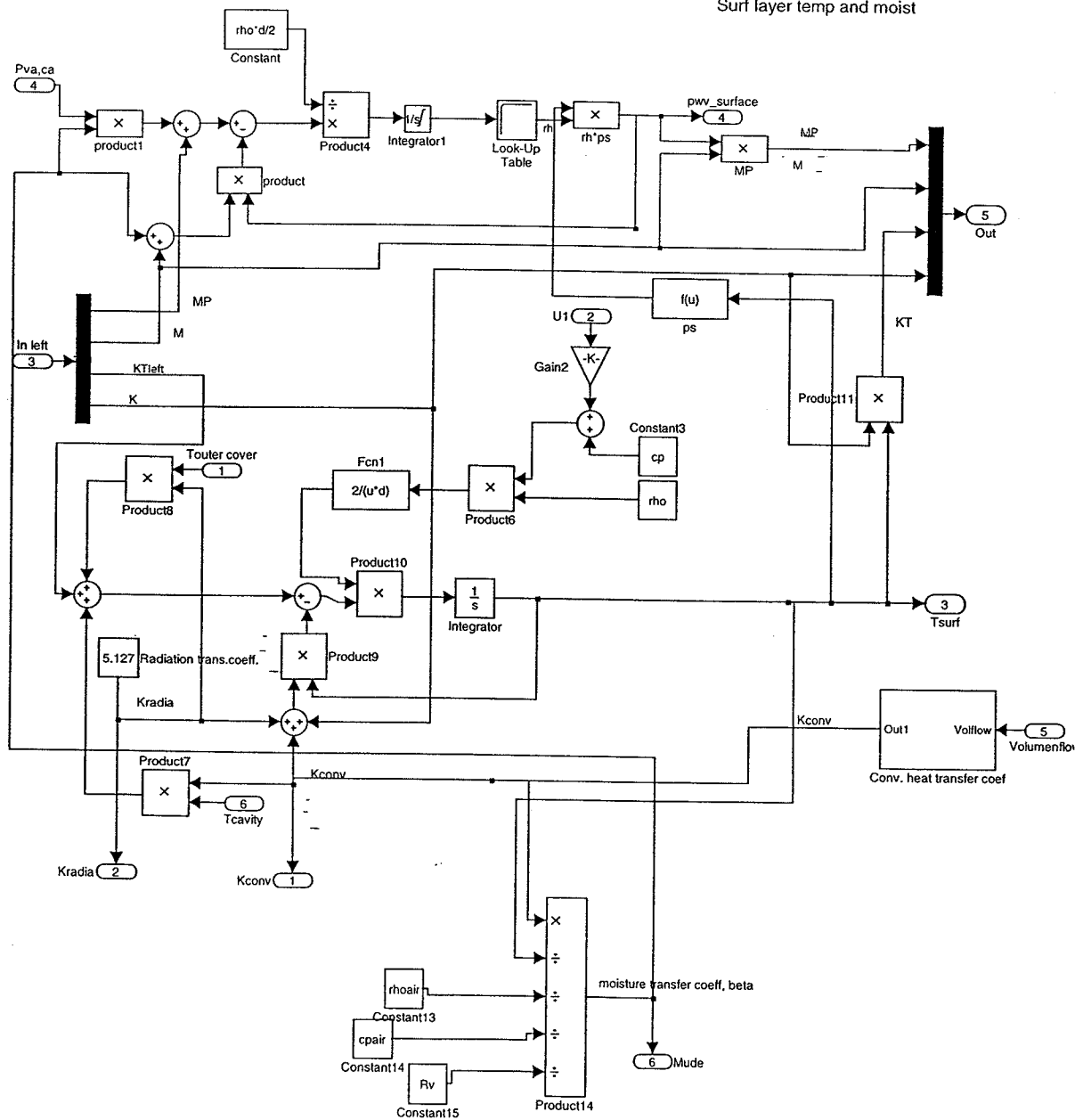


# Node: Temp system

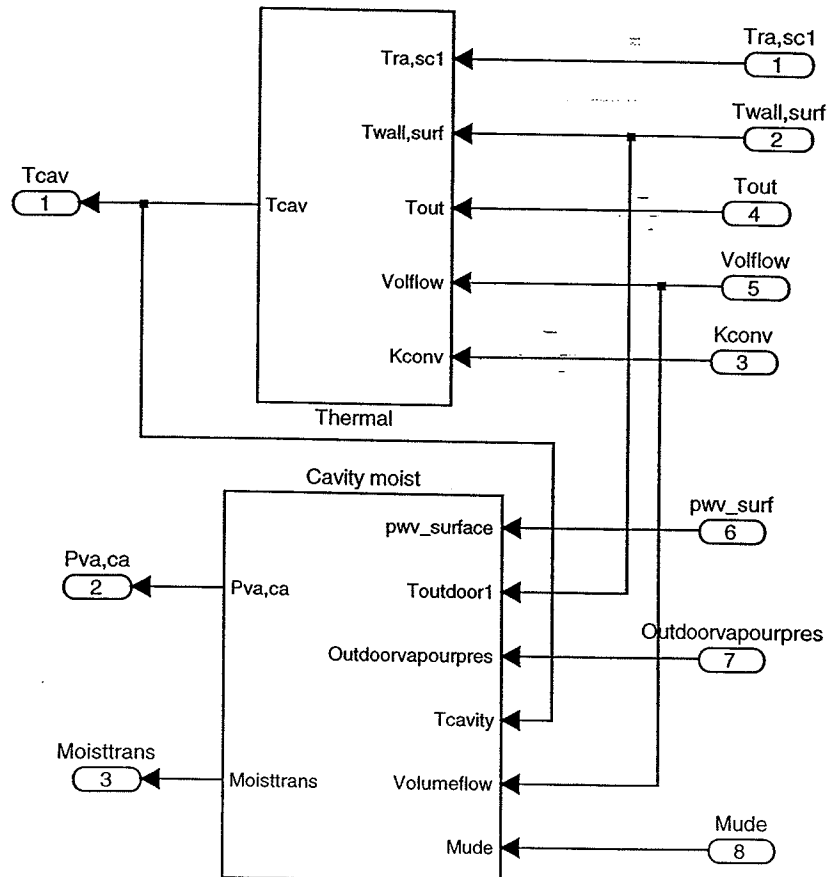




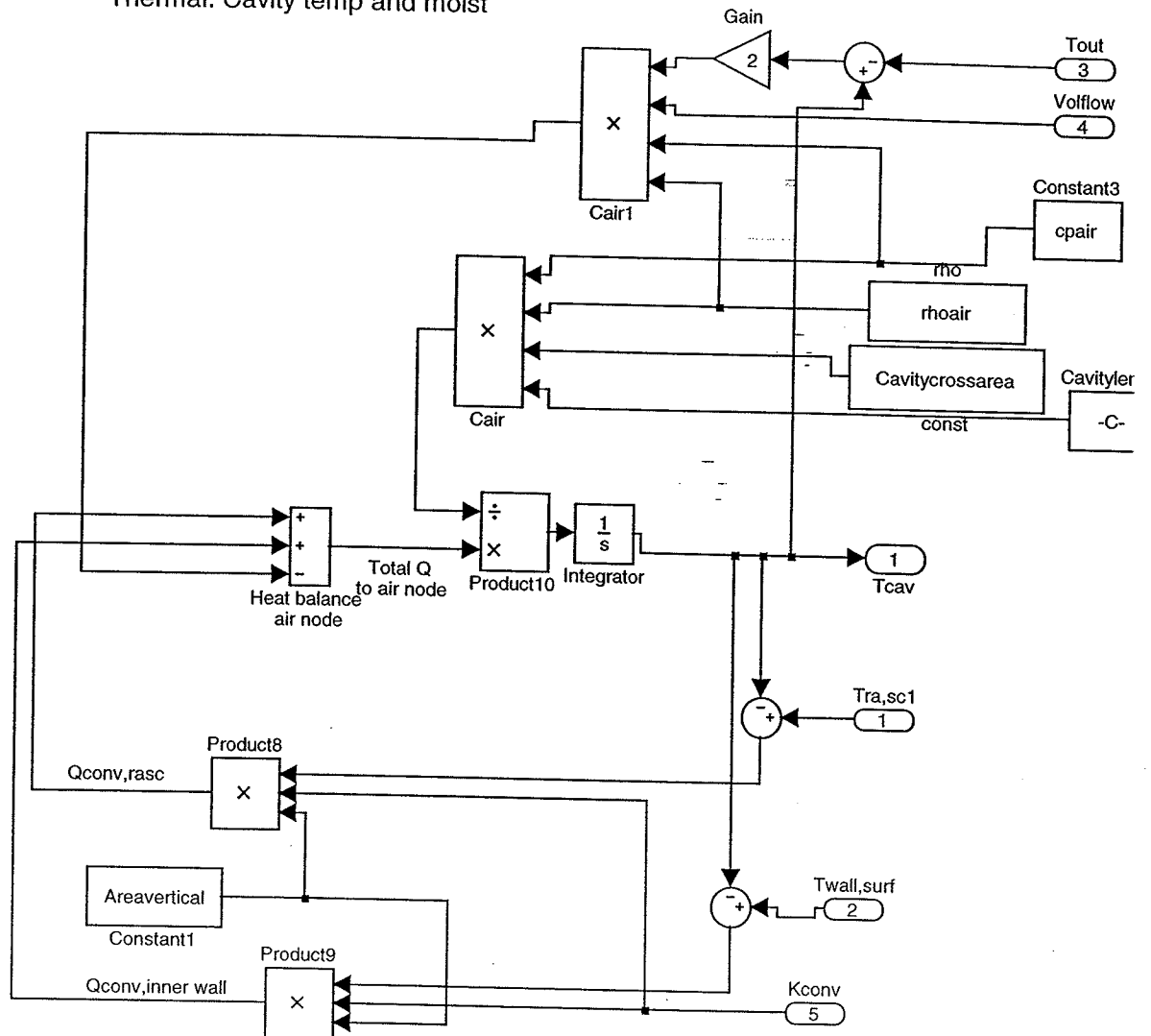
E-5  
Surf layer temp and moist



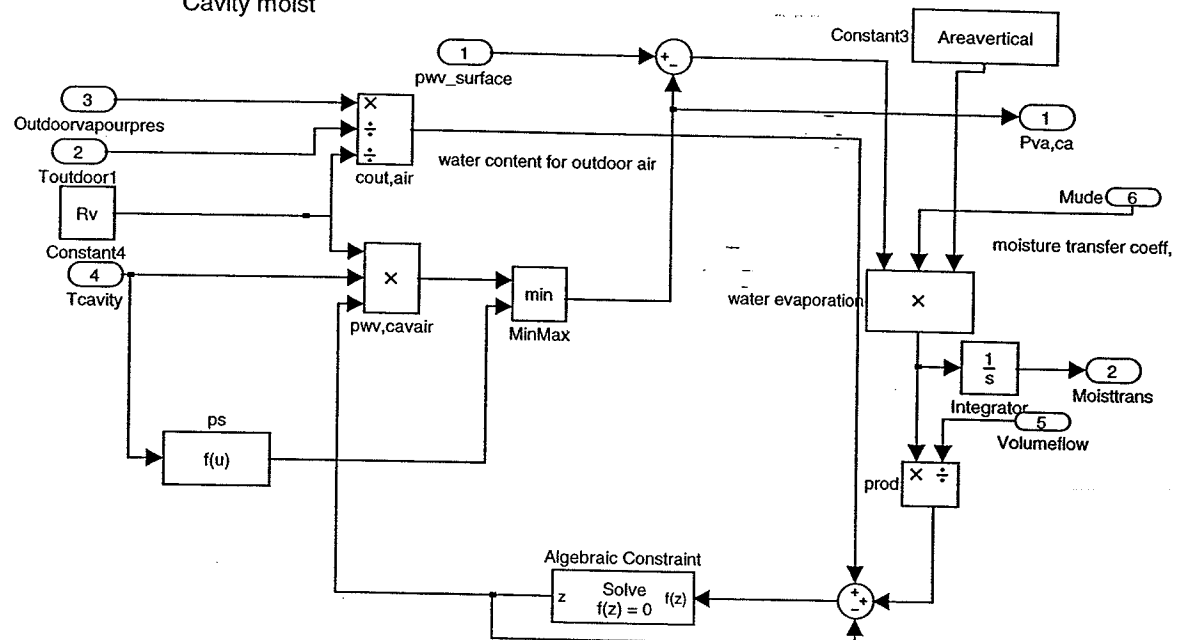
E-6  
Cavity temp and moist

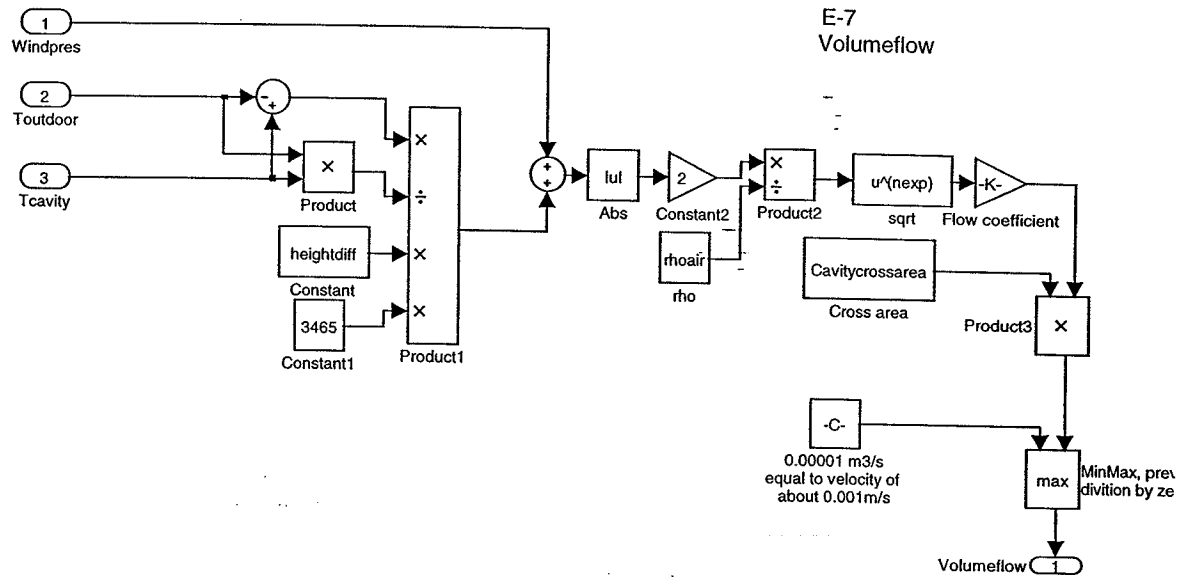


# Thermal: Cavity temp and moist



22

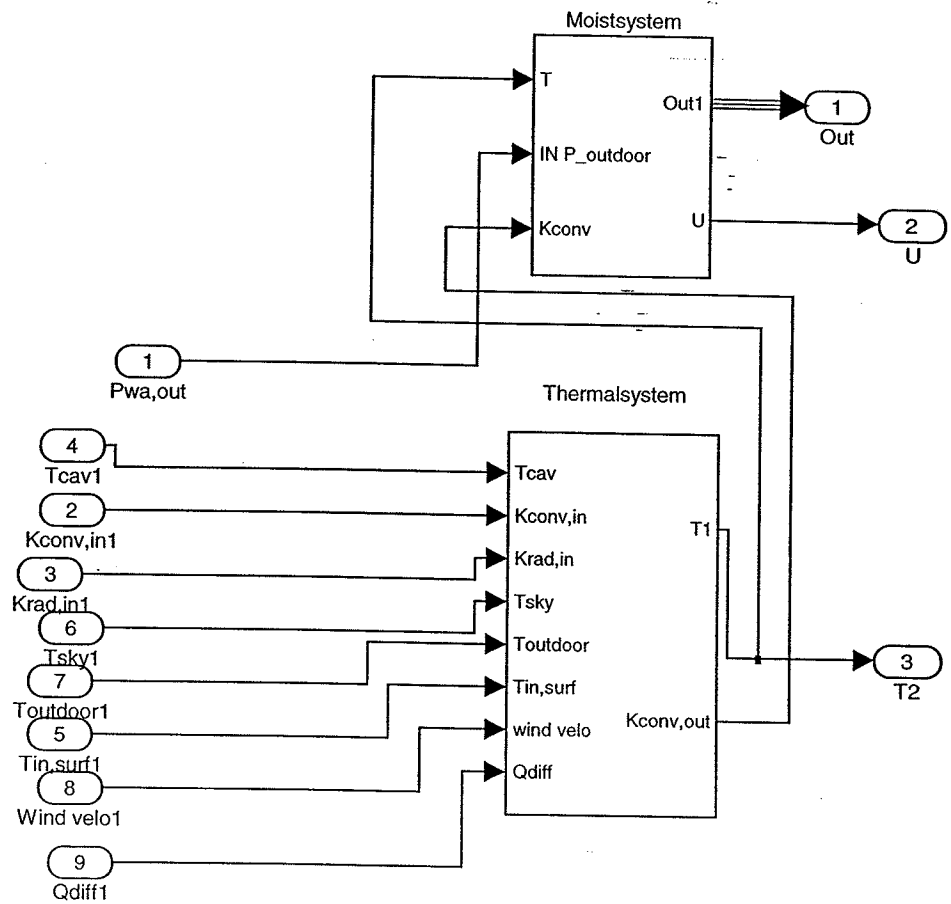




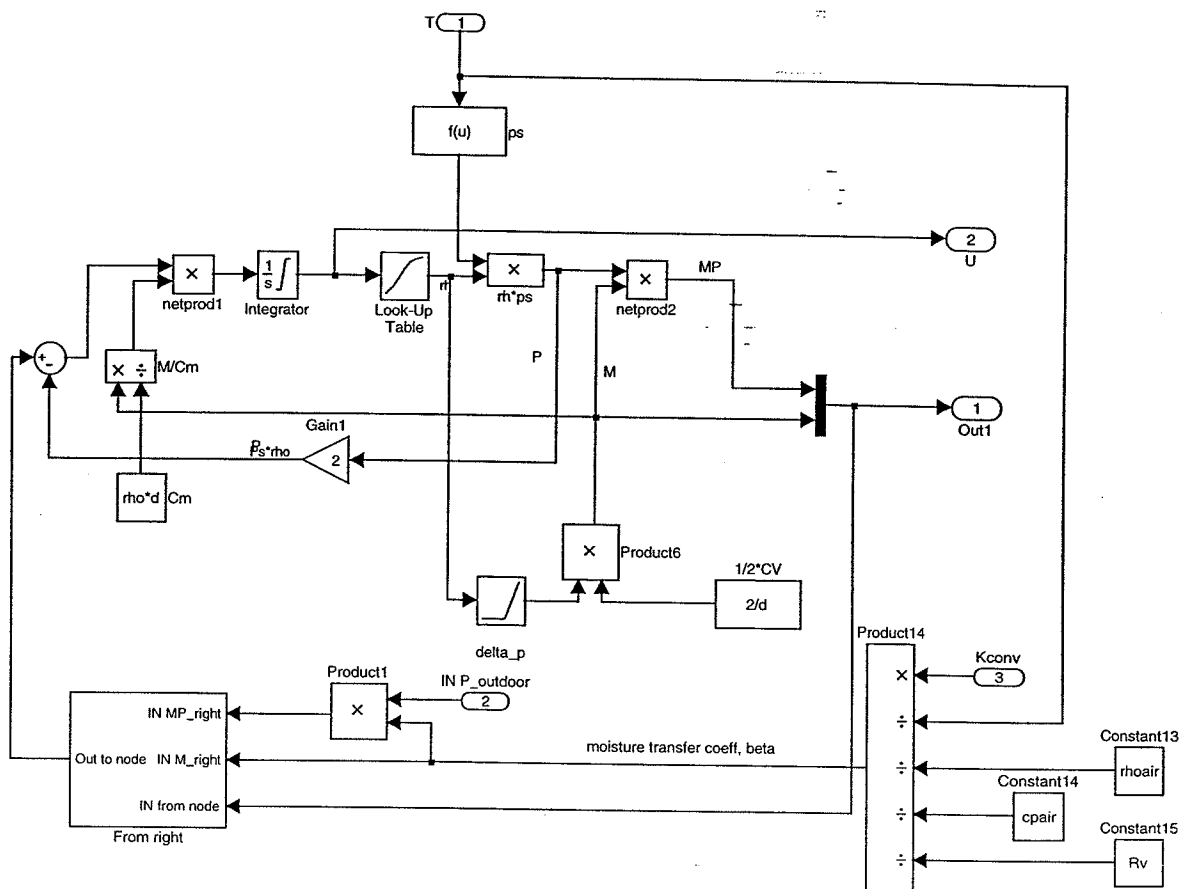


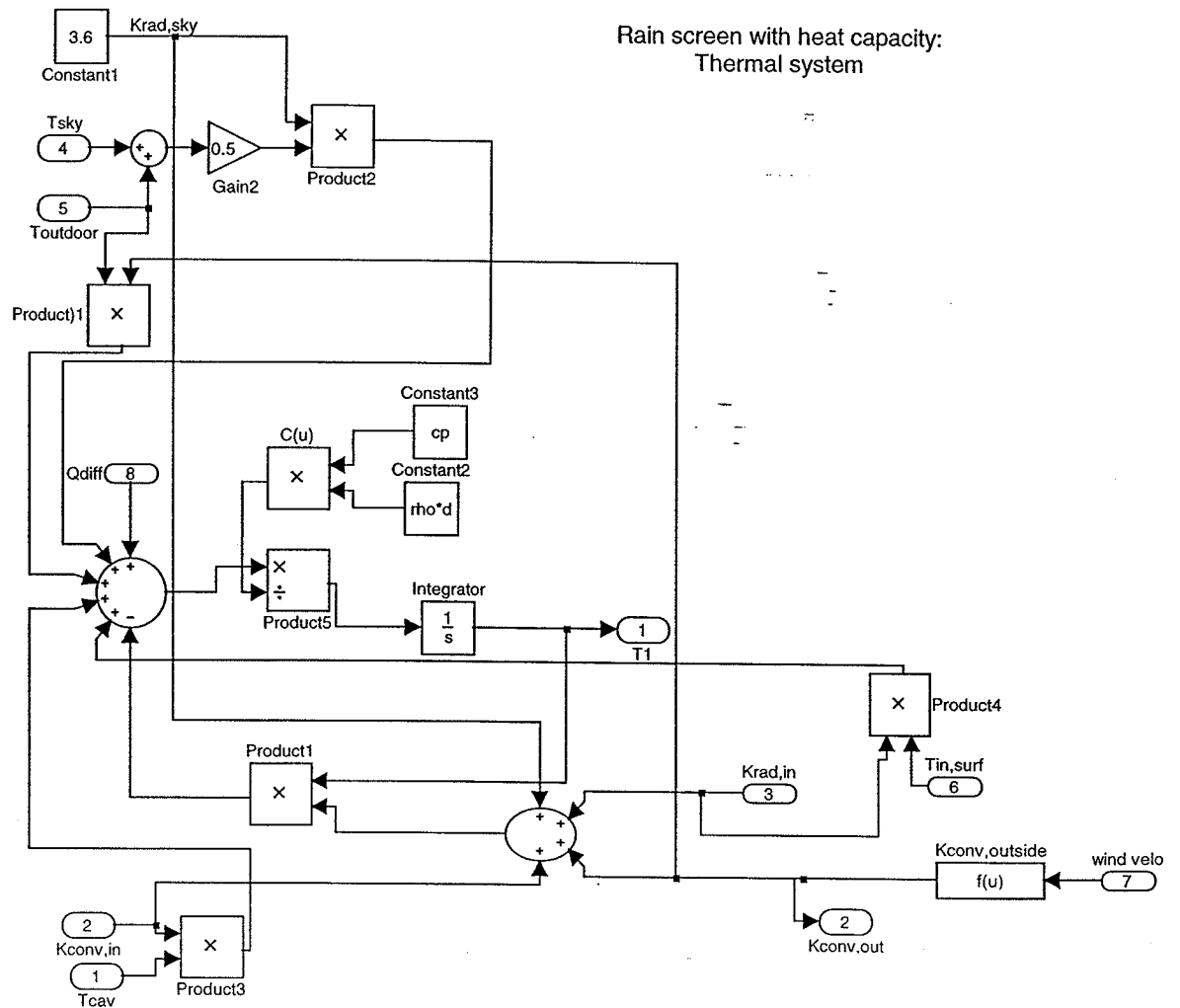
## E-8 Rain screen with heat capacity

Node calculates the surface conditions of the rain screen

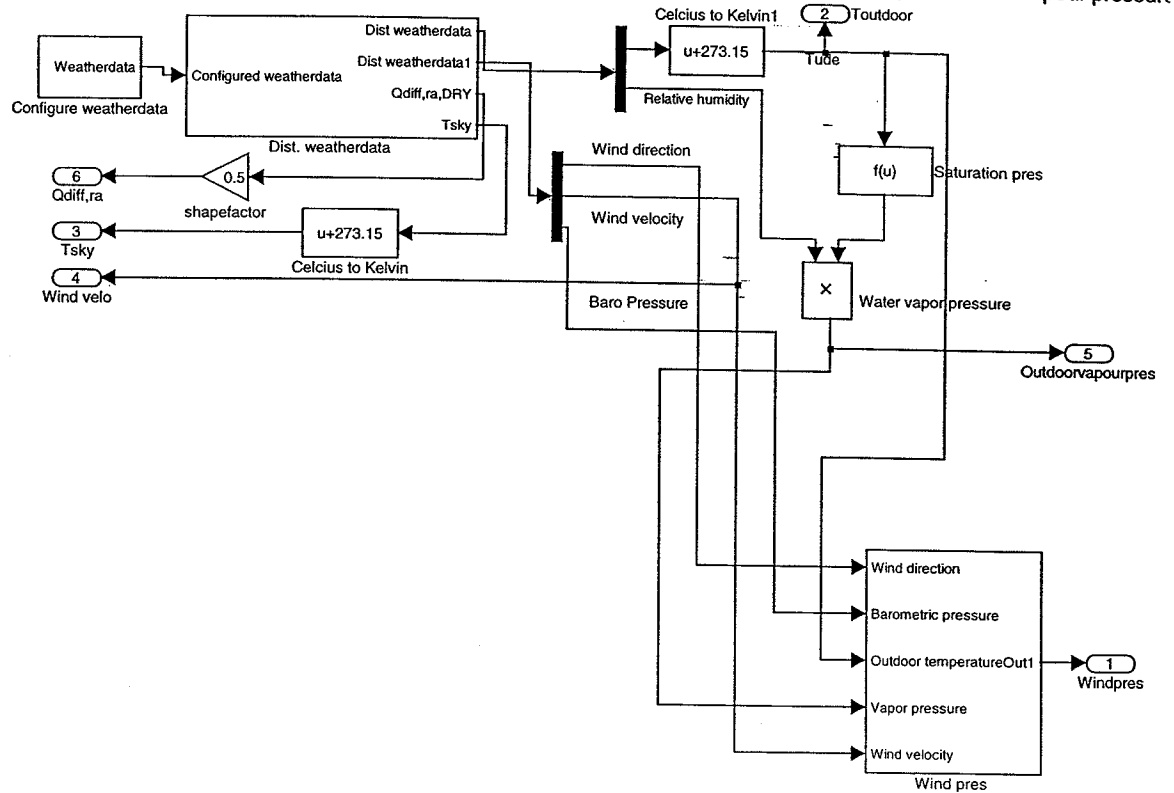


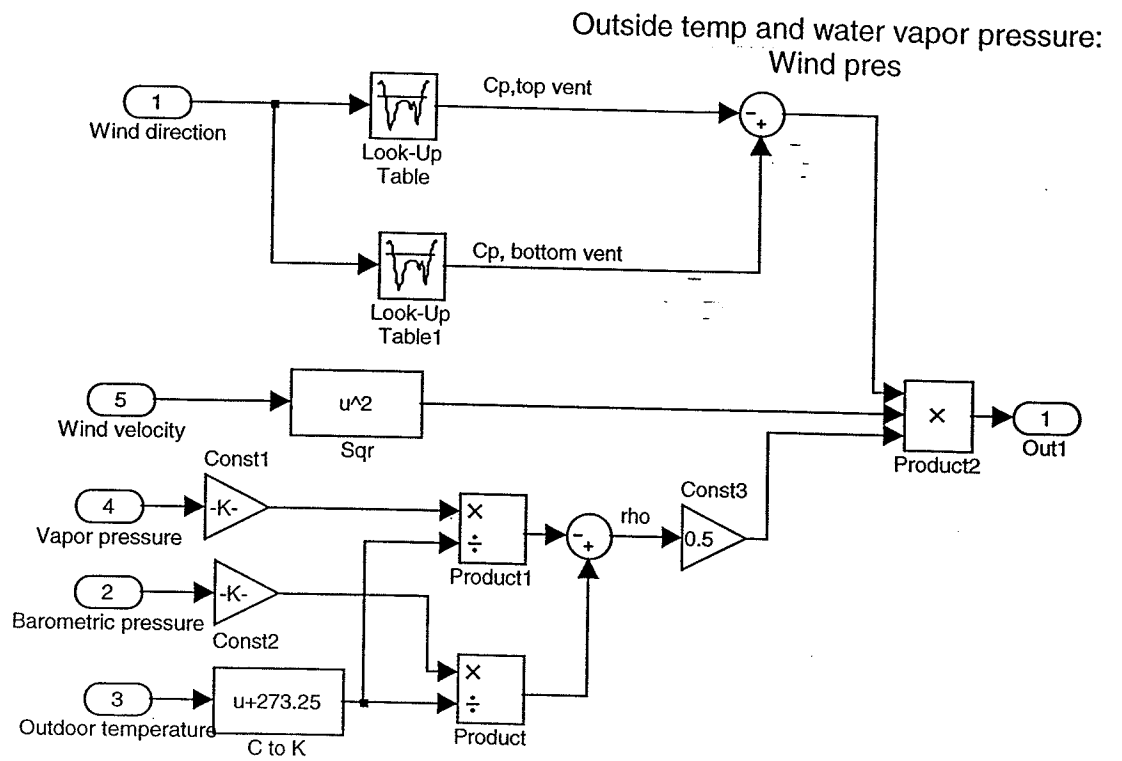
# Rain screen with heat cap: Moistsystem



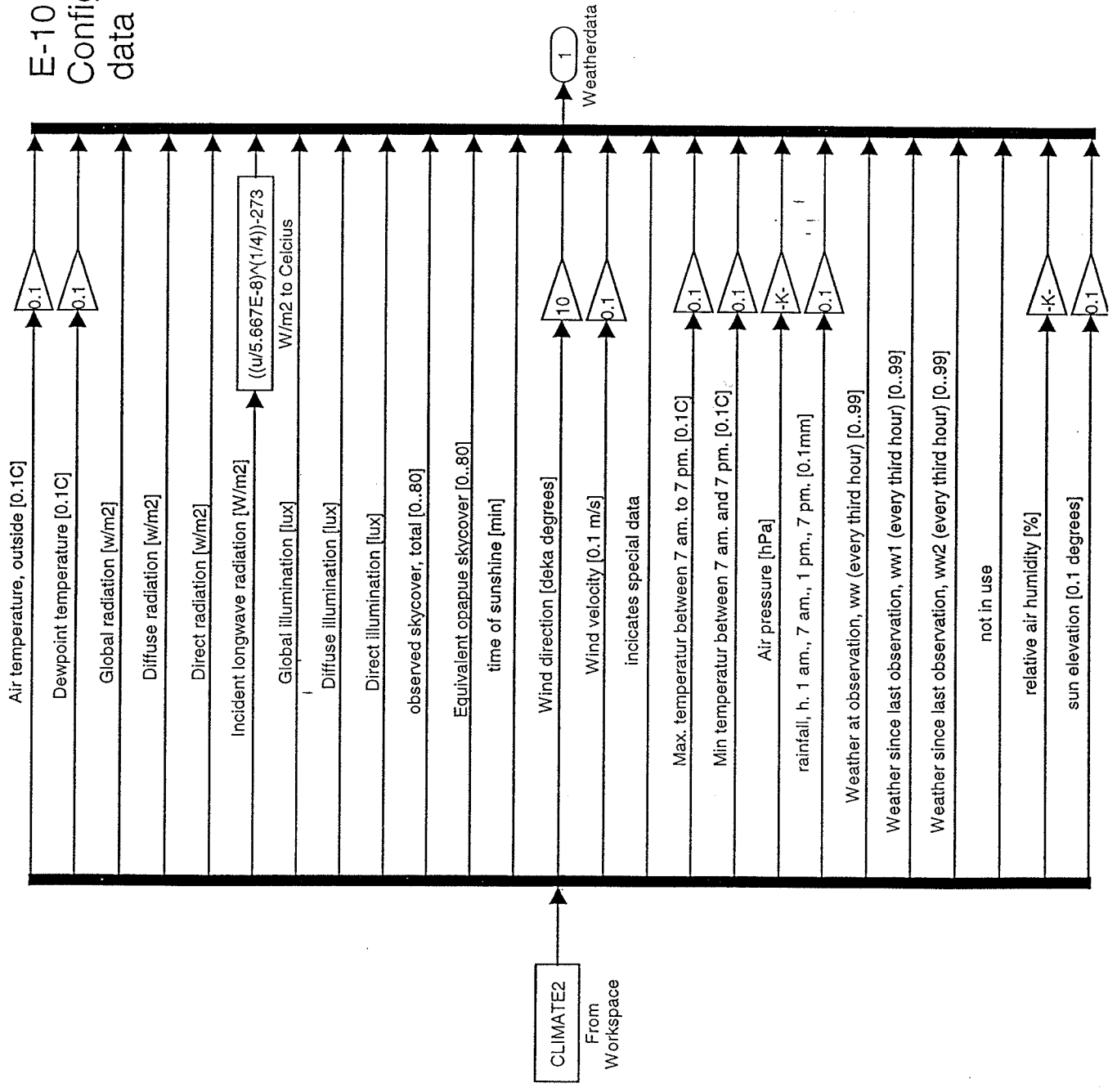


Outside temp and water vapour pressure





# E-10 Config weather data



Air temperature, outside [1C]

Dewpoint temperature [1C]

Global radiation [w/m2]

Diffuse radiation [w/m2]

Direct radiation [w/m2]

Incident longwave radiation [T sky]

Global illumination [lux]

Diffuse illumination [lux]

Direct illumination [lux]

observed skycover, total [0..80]

Equivalent opaque skycover [0..80]

time of sunshine [min]

Wind direction [degrees]

Wind velocity [1 m/s]

indicates special data

Max. temperatur between 7 am. to 7 pm. [1C]

Min temperatur between 7 am. and 7 pm. [1C]

Air pressure [Pa]

rainfall, h. 1 am., 7 am., 1 pm., 7 pm. [1mm]

Weather at observation, ww (every third hour) [0..99]

Weather since last observation, ww1 (every third hour) [0..99]

Weather since last observation, ww2 (every third hour) [0..99]

not in use

relative air humidity [%]

sun elevation [1 degrees]

E-11

Dist. Weatherdata

Qdiff,ra,DRY

Tsky

Dist weatherdata

Climatefile gives value 990 for changing directions

Dead Zone

Dist weatherdata 1

# Appendix F

HAM transport in materials, including liquid transport and thermo effusion



The model for the HAM transport in materials, including liquid transport and thermo effusion, suggested by Rode (1998).

$$Eq\ 1\ \rho_0 c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \Delta h \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_p \frac{\partial p}{\partial x} \right) \text{ and}$$

$$Eq\ 2\ \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_p \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{K}{\Xi} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \left( p_s \delta_p \left( \frac{\partial \phi}{\partial T} \right)_u + \frac{\phi \Delta h}{R_v T^2} \right) - \frac{K P_{suc}}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial x}$$

where

$T$	is the temperature	[K]
$t$	is the time	[s]
$\rho_0$	is the dry density of the material	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c_p$	is the specific heat capacity of the material	[J/kgK]
$x$	is the coordinate	[m]
$\lambda$	is the thermal conductivity	[W/mK]
$u$	is the moisture content, kg water per kg dry material	[-]
$p_s$	is the saturation water vapour pressure	[Pa]
$\delta_p$	is the vapour permeability with vapour pressure as driven potential	[kg/(Pa s m)]
$\xi$	is the slope of the sorption isotherm of the material	[-]
$K$	is the hydraulic transport coefficient	[kg/(m s Pa)]
$\Xi$	is the slope of the suction curve of the material	[-]
$\phi$	is the relative humidity in the porous air	[-]
$\Delta h$	is the phase change enthalpy for vapour/liquid	[J/kg]
$R_v$	is the gas constant for water vapour = 461.5	[J/(kg K)]
$P_{suc}$	is the suction pressure in the porous of the material	[Pa]
$\sigma$	is the surface tension of the water	[N/m]

The heat transfer, Eq 1, is assumed to be conduction combined with transfer of latent heat from moisture transport. The thermal conductivity is a function of temperature and moisture content.

For moisture transfer the first part of the Eq 2 is the water vapour diffusion driven by partial water vapour pressure difference and liquid transport in the pores driven by difference in suction pressure. The second part is the temperatures influence on the water vapour transport.

# Appendix G

Calculation of discharge coefficients

## Calculation of the discharge coefficient

Straube and Burnett (1995), Andersen (2001) and Kronvall (1980) suggest the friction factors differently. An example was made for comparison between the discharge coefficients.

*Comparison of discharge coefficients with different estimates of the friction factors.*

	$\xi_{\text{entrance}}$	$\xi_{\text{pipe/sloth}}$	$\xi_{\text{exit}}$	$C_D$
Burnett & Straube	0.5	3.17	0.88	0.47
Kronvall	1.80	3.17	0	0.45
Andersen	0.4/0.5	3.456	0.1	0.50/0.50

It was found that the discharge coefficient was about the same, though the single resistances vary between the authors. Kronvall (1980) determines the entrance resistance as a function of the air velocity, where Andersen (2001) and Straube and Burnett (1995) choose constant values. Andersen (2001) makes detailed calculation of the resistance in the pipe where the others use a more simple expression.

### Example

The example was airflow with velocity 0.3 m/s through a smooth pipe with sharp edges at both the inlet and exit. The duct had the width of 0.559 m and depth of 0.025 m, further the flow path length,  $L$ , was 1.65 m and Reynolds number was approximately 1000.

For the further analysis Reynolds number based on the hydraulic diameter, will be used.

$$Re = \frac{D_H \cdot V}{\nu}$$

where

$$D_H \quad \text{is the hydraulic diameter, } D_H = \frac{4 \cdot A}{P},$$

and

$$P \quad \text{is the perimeter.}$$

For the cavity between two parallel plates the hydraulic diameter becomes 2 times the dept of the cavity.  $D_H = 2 \cdot d$

### Straube and Burnett (1995)

Straube and Burnett (1995) suggest constant values for the friction factors of entrance and exit

$$\xi_{\text{entrance}} = 0.5$$

$$\xi_{\text{pipe}} = \frac{96}{Re} \cdot \frac{L}{D_H} = \frac{96}{1000} \cdot \frac{1.65}{0.05} = 3.17$$

$$\xi_{\text{exit}} = 0.88$$

$$C_D = \sqrt{\frac{1}{\sum \xi}} = \sqrt{\frac{1}{0.5 + 3.17 + 0.88}} = 0.469$$

**Kronvall (1980)**

Kronvall (1980) presents an important work with detailed measurements of the friction coefficients for entrance and exit, and surface roughness of plates on a number of building materials. He uses a Reynolds number based on the hydraulic diameter like Straube and Burnett, and Darcy-Weisbach for the pressure drop across the pipe (sloth).

$$\Delta P_{entrance} = \xi_{entrance} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2\right)$$

where

$$\xi_{entrance} = (1 - \sigma)^2 + K_c$$

The ratio of constriction area to frontal area,  $\sigma$ , is the cross sectional area of the sloth/pipe divided by the cross sectional area outside the sloth/pipe. It follows that  $\sigma$  is close to 0 for an entrance exposed to the open surroundings.

Kronvall has by his experiments found that the contraction factor,  $K_c$ , depends on the Reynolds number and the ratio of constriction.

Reynolds number	Contraction factor $K_c$
-1000	$0.98 \cdot Re^{-0.03} - 0.067\sigma + 0.373\sigma^2$
1000-3000	$10.59 \cdot Re^{-0.374} - 0.067\sigma + 0.373\sigma^2$
3000-	$0.57 \cdot Re^{-0.01} - 0.067\sigma + 0.373\sigma^2$

$$\xi_{entrance} = (1 - 0)^2 + 0.98 \cdot 1000^{-0.03} = 1.80$$

The friction factor for the exit, is investigated too, and it is found that

$$\xi_{exit} = K_e - (1 - \sigma)^2$$

where

$K_e$  the contraction factor  $K_e = 1$  for  $\sigma < 0.05$

Therefore the friction factor for the exit of a vent exposed to the open area:

$$\xi_{exit} = 1 - (1 - 0)^2 = 0$$

$$\Delta P_{drive} = (\xi_{entrance} + \xi_{pipe}) \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2\right)$$

Like the first example, the friction factor of the pipe

$$\xi_{pipe} = \frac{96}{Re} \cdot \frac{L}{D_H} = \frac{96}{1000} \cdot \frac{1.65}{0.05} = 3.17$$

For the comparison the discharge coefficient was found:

$$C_D = \sqrt{\frac{1}{\Sigma \xi}} = \sqrt{\frac{1}{1.80 + 3.17}} = 0.449$$

**Andersen (2000)**

A theoretical work on the airflow in ventilated cavities in wall structures is presented in (Andersen, 2000). Where the friction factor for entrance and exit are suggested constant:

$$\xi_{\text{entrance}} \sim 0.4-0.5$$

$$\xi_{\text{exit}} \sim 0.1$$

The flow has an entrance zone where the flow is not fully developed. The distance from the entrance to fully developed flow is called the entrance length. In this entrance zone, the friction factor is different compared to further upstream the flow. Andersen (2000) suggests that this is included in the calculation of the friction

factor across the sloth/pipe. The entrance length,  $x_L$ , is found from  $\frac{x_L}{d} \approx \frac{Re_d}{50}$ . It should here be noted that

Reynolds number is with regard to the debt,  $d$ , of the cavity (instead of the hydraulic diameter,  $D$ ), meaning that  $Re_d = \frac{1}{2} \cdot Re_D$ . For laminar flow in the fully developed zone, the friction factor is like before

$$f = \frac{48}{Re_d} = \frac{96}{Re_D}. \text{ The mean friction at the entrance length is approximately for } x < x_L \text{ (Andersen, 2000):}$$

$$f_L = f \cdot 1.6, \text{ and the friction coefficient is an weighted average of } f \text{ and } f_L.$$

$$\begin{aligned} \xi_{\text{pipe}} &= f_{\text{mean}} \cdot \frac{L}{D_H} \\ &= \frac{f_L \cdot x_L + f \cdot (L - x_L)}{L} \cdot \frac{L}{D_H} \\ &= f \cdot \frac{1.6 \cdot x_L + (L - x_L)}{L} \cdot \frac{L}{D_H} \\ &= \frac{f \cdot (0.6 \cdot x_L + L)}{D_H} \end{aligned}$$

With the number from the example, the entrance length is found:

$$x_L = \frac{\frac{1}{2} \cdot Re_D \cdot d}{50} = \frac{1000 \cdot 0.025}{100} = 0.25m$$

The friction coefficient for the pipe/sloth is:

$$\xi_{\text{pipe}} = \frac{96}{1000} \cdot \frac{(0.6 \cdot 0.25 + 1.65)}{0.05} = 3.456$$

For the comparison, the discharge coefficient was calculated for entrance friction factor of both 0.4 and 0.5:

$$C_d = \sqrt{\frac{1}{\sum \xi}} = \sqrt{\frac{1}{0.4 + 3.456 + 0.1}} = 0.503$$

$$C_d = \sqrt{\frac{1}{\sum \xi}} = \sqrt{\frac{1}{0.5 + 3.456 + 0.1}} = 0.497$$

It was found that the discharge coefficient by Andersen is comparable with the ones suggested by Kronvall and Burnett & Straube. For  $Re=1000$  the discharge coefficient by Kronvall is close to the one suggested by Burnett and Straube [1995]. As the  $\xi$  for the entrance depends on Reynolds number, and therefore of the velocity, it must be assumed that Kronvall predicts the pressure drop more accurate than Burnett and Straube.

#### Scattered vent, with a discharge coefficient of 0.26

In the simulations, a discharge coefficient of 0.26 was used to simulate limited ventilation area. This discharge coefficient of 0.26 corresponds to a cavity dept of approximately 6 mm, using either the equations by Kronvall (1980) or by Burnett and Straube (1995).

$$C_D = 0.26 = \sqrt{\frac{1}{1.80 + \frac{96}{1000} \cdot \frac{1.65}{X}}}$$

⇕

$$14.7929 = 1.80 + \frac{96}{1000} \cdot \frac{1.65}{X}$$

⇕

$$X = 0.012$$

The X found above was the hydraulic diameter, the cavity dept was therefore 6 mm.

# Appendix H

Parameters in the Simulink reference year

## Appendix H

List of parameters used in the Simulink reference year. Data was taken from the Danish Design Reference Year (DRY) (Jensen and Lund, 1995).

Column #	Description	Unit
1	Time	Seconds
2	Air temperature	0.1°C
3	Air dew point temperature	0.1°C
4	Global horizontal radiation	W/m <sup>2</sup>
5	Diffuse horizontal radiation	W/m <sup>2</sup>
6	Direct normal radiation	W/m <sup>2</sup>
7	Long wave radiation to the firmament	W/m <sup>2</sup>
8	Global illumination	Lux
9	Diffuse illumination	Lux
10	Direct illumination	Lux
11	Total observed cloudiness	0..80
12	Equivalent opaque cloudiness	0..80
13	Time of sunshine	Minutes
14	Wind direction	Deca degree
15	Wind velocity	0.1 m/s <sup>2</sup>
16	Indication of special data	
17	Maximum temperature	0.1°C
18	Minimum temperature	0.1°C
19	Air pressure	Hecto Pa
20	Precipitation	0.1 mm
21	Weather at observation time	0..99
22	Weather since last observation,ww1	0..9
23	Weather since last observation,ww2	0..9
24	Free	
25	Relative humidity	%
26	Height of sun	0.1°



# Appendix I

Moisture measurements at Danish Building and Urban Research

The wood-dowels of beech used for the measurements of moisture contents in facade wall at the Danish Building Research Institute has been calibrated and temperature compensated.

The moisture content in the beech was found from measurements of the resistance  $R_T$  [log MΩ] at a temperature  $T$ , after temperature correction.

The temperature is corrected by

$$\text{Eq 1 } R = R_T - (0.029 + 0.005 \cdot R_T) \cdot (20 - T)$$

where

$T$  is temperature in °C.

The moisture content,  $u$  [kg water/ kg dry material] was found by

$$u = \frac{0.1437}{\left( \ln \frac{-5.4905}{R - 4.0991} \right)^{\frac{1}{2.1439}}}$$

The moisture content,  $u$ , in the beech dowel correspond to a relative humidity by the sorption isotherm for beech. Ahlgren (1972) has measured the absorption and the desorption isotherms, at temperatures not known, but properly near 20°C (Peuhkuri, 2000). The sorption properties are valid for temperatures near 20°C, where the sorption decrease with increasing temperature (Nevander, 1994). Even though there in building structures occurs situations with other temperatures, there is normally not compensated for this. The error due to temperature depended sorptioncurve is considered small compared to the effect of hysteresis. (Rode, 19xx)

An expression of the sorption isotherm is constructed from the absorption and desorption values measured by Ahlgren (1972). The approximation is of the form used by Hansen (1986)

$$u = A \cdot \exp\left(\frac{-1}{B} \cdot \ln\left(1 - \frac{\ln \varphi}{C}\right)\right)$$

where

$\varphi$  is the relative humidity

The values in the equation is fitted by the program CurveExpert 1.2, where the constants were found:

A= 31.33  
B= 1.21  
C= 0.225

The standard deviation was 1.97 [kg/kg], and the correlation coefficient 0.97.

For the calculations the inverse function was used, to find the relative humidity from the measured moisture content.

$$\varphi = \exp\left(C \cdot \left(1 - \frac{u}{A}\right)^{-B}\right)$$

Here CurveExpert 1.2 found the constants:

A= 31.71  
B= 1.08  
C= 0.264

The standard deviation was 5.28 [%], and the correlation coefficient 0.98.